Die Welt der Strahlen

Von

P. Debye, U. Dehlinger, W. Friedrich, W. Kolhörster,

H. Pfleiderer, W. Ramm, H. Schreiber, H. Wintz

Herausgegeben von

Heinz Woltereck

1 9 3 7

Verlag von Quelle & Meyer in Leipzig

Vorwort

Die Erforschung der Strahlungsvorgänge hat in den letzten Jahrzehnten Ergebnisse gezeitigt, die nicht nur den Naturwissenschaften ganz neue Ausblicke eröffneten, sondern auch für Medizin und Technik Anwendungsmöglichkeiten von weittragender Bedeutung in sich schlossen. Mag es sich um die Röntgenstrahlen oder um die vielgenannte Organismenstrahlung handeln, mögen die kosmischen Höhenstrahlen zur Diskussion stehen oder rein physikalische Probleme der Strahlung erörtert werden — immer wieder zeigt sich, daß die meisten der angeschnittenen Fragen Wissenschaft und Allgemeinheit in stärkstem Maße beschäftigen. Allerdings macht es die weite Verzweigung des Problemkreises „Strahlung" über die verschiedensten Forschungsgebiete von der Atomphysik bis zur technischen Auswertung von Strahlungsvorgängen heute auch dem Fachmann schwer, ja oft geradezu unmöglich, die gesamte Welt der Strahlen und ihre in einem erstaunlich raschen Tempo vorwärtsgetriebene Erforschung wirklich noch zu übersehen. Zu zahlreich sind die einzelnen Wissenschaftsgebiete, die Beiträge zur Lösung der hier vorliegenden Fragen liefern, zu unübersehbar ist die Fachliteratur über die Strahlungsvorgänge der verschiedensten Art angeschwollen. Die starke Spezialisierung der heutigen Wissenschaft hat das Gebiet der Strahlungsforschung in eine große Anzahl einzelner Spezialgebiete mit oft recht schwierigen eigenen Terminologien und Forschungsmethoden aufgelöst, zu deren Verständnis oft genug schon der Vertreter eines wissenschaftlichen „Nachbargebietes" kaum mehr in der Lage ist.

Aus all diesen Gründen erschien es dem Herausgeber angebracht, in einem groß angelegten Sammelwerk einmal einen umfassenden Überblick über den gesamten Bereich der heutigen Strahlungsforschung und ihre Ergebnisse zu geben. Ein solcher Überblick mußte nicht nur die rein physikalischen Grundlagen der Strahlung behandeln, sondern darüber hinaus all jene Wissenschaftsgebiete durch ihre berufensten Vertreter zu Wort kommen lassen, die mit ihrer Arbeit in die Erforschung der Strahlungsprobleme eingreifen. Die rein medizinische Anwendung der Strahlen war ebenso zu würdigen, wie die Erforschung der „Lebensstrahlen" und der kosmischen Höhenstrahlung. Auch die moderne Bioklimatologie findet ein wichtiges Arbeitsfeld auf dem Gebiet der Strahlenforschung, und schließlich war eine Darstellung der technischen Anwendung von

Strahlen notwendig, da die hierhergehörigen Methoden der Technik in Theorie und Praxis einen ständig wachsenden Raum einnehmen.

Das vorliegende Werk ist zunächst für solche Leser bestimmt, die sich über den Rahmen ihres engeren Fachgebietes hinaus über den Stand der Strahlungsforschung auf anderen Wissenschaftsgebieten an Hand der Darlegungen erster Fachgelehrter zu orientieren wünschen. Es verfolgt darüber hinaus die Absicht, auch dem Nichtfachmann eine alles Wesentliche umfassende Darstellung des heutigen Standes einer Frage zu geben, die zu den interessantesten und wichtigsten gehört, mit deren Erforschung sich die moderne Wissenschaft beschäftigt. Die Darstellungsform des Werkes wurde daher bewußt so gehalten, daß auch ein Leser ohne spezielle Vorbildung ihr ohne Schwierigkeiten folgen kann.

Leipzig, im November 1936 — Dr. Heinz Woltereck

Inhaltsverzeichnis

Grundlagen der Strahlungsphysik

Von Professor Dr. Dr. h. c. P. Debye, Direktor des Kaiser-Wilhelm-Instituts für Physik, Berlin, und Dr. W. Ramm, Berlin

Die Strahlen im Dienste der Heilkunde

Von Professor Dr. med. et phil. H. Wintz, Direktor der Frauenklinik und des Röntgen-Instituts der Universität Erlangen

Die bioklimatische Bedeutung der Strahlen

Von Privatdozent Dr. med. H. Pfleiderer, Leiter der bioklimatischen Forschungsstelle der Universität Kiel

Organismenstrahlung

Von Professor Dr. W. Friedrich, Direktor des Instituts für Strahlenforschung der Universität Berlin, und Dozent Dr. H. Schreiber, Berlin

Die Höhenstrahlung

Von Professor Dr. W. Kolhörster, Direktor des Instituts für Höhenstrahlenforschung der Universität Berlin

Die technische Anwendung der Strahlen

Von Professor Dr. U. Dehlinger, Abteilungsleiter beim Kaiser-Wilhelm-Institut für Metallforschung, Stuttgart

Grundlagen der Strahlungsphysik

Von Professor Dr. Dr. h. c. P. Debye und Dr. W. Ramm

I. Wellenstrahlung

1. Lichtstrahlen und Lichtwellen

Diejenigen Strahlen, die wir alle am besten kennen, weil wir ihnen im täglichen Leben am häufigsten begegnen, sind die Strahlen des Lichtes. Jeder hat schon die Sonnenstrahlen bemerkt, die in einem dunklen Zimmer sichtbar werden, wenn die Sonne nur durch eine kleine Öffnung hereinscheinen kann, oder draußen in freier Landschaft die fächerförmigen Strahlen beobachtet, in denen das Sonnenlicht durch Wolkenlücken dringt. Auch bei der Vorführung von Lichtbildern sehen wir die Strahlen der Projektionslampe oder nachts am Himmel die Strahlen der Scheinwerfer. Wir können allgemein sagen: die Lichtstrahlen werden immer dann (z. B. durch Streuung an Staubteilchen) sichtbar, wenn das Licht einer hellen Lichtquelle durch eine begrenzte Öffnung nur in einer Richtung hindurchdringen kann, und sie entstehen deshalb, weil das Licht von der Quelle nach allen Seiten geradlinig ausgesandt wird. Die Geradlinigkeit ist die auffallendste und wichtigste Eigenschaft eines Strahles, und wir verwerten sie auch immer dann, wenn es uns darauf ankommt, eine gerade Linie möglichst genau festzulegen, wie beim Zielen, Visieren und der Feldmesserei. Denn das Licht verläuft natürlich auch dann geradlinig von einem Punkt zum anderen, wenn wir den Strahl selbst nicht wie unter den eben erwähnten günstigen Umständen erkennen können.

Daß in seltenen Fällen unter bestimmten Wetterverhältnissen die Lichtstrahlen in der Atmosphäre auch einmal ziemlich krummlinig verlaufen können, beweist die Erscheinung der Luftspiegelung (Fata morgana). Wir werden bei dieser Erscheinung ja gerade deshalb getäuscht, weil wir den Gegenstand, von dem die Strahlen ausgehen, in der geraden Verlängerung der Richtung vermuten, aus der der Strahl in unser Auge gelangt (Abb. 1). Solche krummen Strahlen kommen dann zustande, wenn die Luftschichten in der Nähe des Erdbodens sehr verschieden warm und daher sehr verschieden dicht sind; der Strahl wird beim Übergang aus den dichteren in die dünneren Schichten langsam immer mehr aus

seiner Richtung abgelenkt. Eine ganz leichte Krümmung der Lichtstrahlen infolge solcher Einflüsse ist in der Lufthülle der Erde sogar immer vorhanden (atmosphärische Strahlenbrechung). Die Ursache der Ablenkung ist schließlich in diesen Fällen eine Rückwirkung der raumfüllenden Materie auf die Lichtfortpflanzung. Nach den neueren Gravitations-(Schwerkrafts)-Theorien soll aber das Licht auch durch Gravitationsanziehung aus der geradlinigen Bahn abgelenkt werden können. Aufnahmen von sonnennahen Sternen bei Gelegenheit einer totalen Sonnenfinsternis haben diesen aus der allgemeinen Gravitationstheorie abgeleiteten Effekt bestätigt. Bei diesen Versuchen verläuft das Licht im nahezu materiefreien Weltenraum; die sehr interessante Ablenkung durch Gravitationseinwirkung ist also von der auf der Erde beobachteten prinzipiell verschieden.

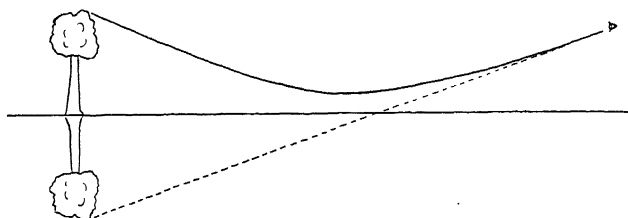



Abb. 1. Krümmung der Lichtstrahlen in der Atmosphäre

Es gibt aber noch eine anders geartete Abweichung von der Geradlinigkeit der Lichtausbreitung, die uns jetzt viel wichtiger ist, weil sie uns dazu führen wird, das Wesen des Lichtes besser zu verstehen. Es zeigt sich nämlich, daß es uns eigentlich gar nicht möglich ist, einen wirklichen Strahl zu erzeugen, d. h. Lichtstrahlen so fein und scharf zu machen, daß sie dem entsprechen, was wir uns unter einem idealen Strahl denken, sondern daß wir über eine gewisse Grenze nicht hinauskommen. Wenn wir einen recht schmalen Strahl erzeugen wollen, brauchen wir zunächst eine möglichst punktförmige Lichtquelle und die können wir uns verschaffen, wenn wir vor unsere Lampe einen Schirm mit einer kleinen Öffnung anbringen, durch die das Licht in verschiedenen Richtungen hindurchdringt (Abb. 2). Wir stellen nun hinter den ersten Schirm in einiger Entfernung (etwa 1 m) einen zweiten mit einer Öffnung, deren Größe wir verändern können und beobachten auf einem dritten weißen Schirm (wieder etwa 1 m entfernt) den Lichtfleck, den der durch die zweite Öffnung ausgeblendete Strahl hervorruft. Die nächste Figur (Abb. 3) zeigt uns in graphischer Darstellung, wie die Helligkeit im Strahl verteilt ist, wenn diese Öffnung einmal ziemlich breit (a etwa 1 mm), dann schmäler (b $^1/_{10}$ mm) und endlich sehr schmal (c $^1/_{100}$ mm) gemacht wird. Im Fall a erhalten wir einen verhältnismäßig breiten, aber sehr scharf begrenzten Strahl, bei dem die Helligkeit sehr schnell am Rande des Strahles auf ihren vollen Betrag anwächst. Im Fall b macht sich nun aber eine Erscheinung bemerkbar, die wir zunächst nicht er-

Abb. 2. Versuch der Herstellung eines Lichtstrahls

warten würden: Zunächst nimmt nämlich bei Verkleinerung der Öffnung die Breite des Strahlenbündels, wie erwartet, ab, von einer gewissen Grenze an vergrößert sie sich aber wieder, und die Strahlenbegrenzung wird verwaschener als im Fall a; außerdem treten, wenn wir eine helle Lichtquelle verwenden, neben dem Hauptstrahl auf den Seiten noch weitere schwache Erhellungen auf. Noch deutlicher zeigt sich die Widerspenstigkeit des Lichtes gegen die Einzwängung in einen zu engen Strahl im Fall c, wir erhalten nur noch einen ganz diffusen Fleck, dessen Ausdehnung die Breite der Öffnung um ein Vielfaches übertrifft.

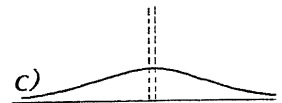
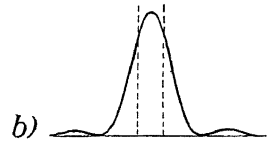
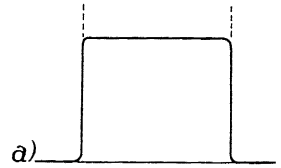
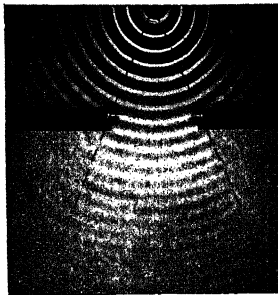



Abb. 3. Der Mißerfolg bei Ausführung des Versuchs Abb. 2. Engere Öffnung (durch gestrichelte Linien angedeutet) ergibt breitere trahlenbüschel

Zu einem Verständnis für dieses Mißlingen unseres Versuches, den Strahl weiter zu verfeinern, gelangen wir am leichtesten, wenn wir uns die folgenden Bilder betrachten, auf denen das Verhalten von Wasserwellen beim Durchgang durch eine Öffnung gezeigt wird. Von einem Punkt der Wasseroberfläche, der irgendwie in Bewegung versetzt wird, gehen kreisförmige Wellen aus, die durch eine größere Öffnung in einer Zwischenwand in einen Teil des Behälters mit ruhiger Oberfläche hinübertreten können (Abb. 4). Man sieht, daß diese Oberfläche nur dort in Bewegung kommt, wo die Wellen von ihrem Ausgangspunkt aus geradlinig hingelangen können. Die Wellen breiten sich also strahlenförmig aus wie das Licht in Abb. 3a. Machen wir nun aber die Öffnung kleiner, etwa so groß wie den Abstand zweier aufeinander folgender Wellenringe, so wird sie gewissermaßen zum Ausgangspunkt einer neuen Wellenschar (Abb. 5). Die Wasseroberfläche wird daher im zweiten Behälter in einem größeren Gebiet in Bewegung versetzt, und die Ausbreitung der Wellen ähnelt damit jetzt mehr dem Verhalten des Lichtes beim Durchgang durch eine sehr enge Öffnung (Abb. 3c). Ob bei Wasserwellen das Bild 4 oder das Bild 5 zustande kommt, hängt also davon ab, ob die Öffnung in der Zwischenwand wesentlich größer ist als die Entfernung zweier Wellenringe oder nicht, und wir werden daher vermuten, daß dieser Abstand zweier aufeinander folgender Wellenberge oder Wellen-

Abb. 4. Abb. 5.

Durchgang von Wasserwellen durch eine weite und eine enge Öffnung

(Nach R. W. Pohl, Einführung in die Mechanik und Akustik)

täler, den wir als Wellenlänge bezeichnen, für eine Wellenbewegung von besonderer Bedeutung ist.

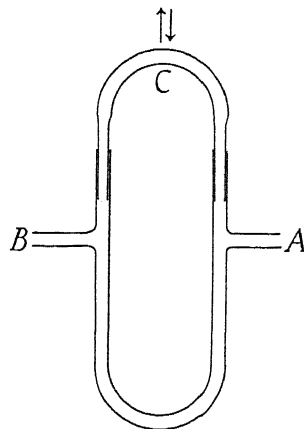
Es ist nun naheliegend, aus den analogen Erscheinungen bei der Ausbreitung des Lichtes einerseits und der Fortpflanzung von Wasserwellen andererseits den Schluß zu ziehen, daß wir es auch beim Licht mit einer irgendwie gearteten Wellenbewegung zu tun haben. Nur ist dann von vornherein anzunehmen, daß die Wellenlänge der Lichtwellen viel kleiner sein wird als die der Wasserwellen, weil sich beim Licht erst bei im Vergleich zu den Wasserversuchen sehr viel feineren Öffnungen Abweichungen von der Geradlinigkeit des Strahlenverlaufes zeigen.

Die Hypothese von der Wellennatur des Lichtes wurde zuerst von C. Huygens um 1680 aufgestellt, und es sind seitdem noch viele neue Eigenschaften des Lichtes bekannt geworden, die alle mit dieser Hypothese übereinstimmten und sich sogar oft nur durch sie erklären ließen. Wir werden noch näher sehen, wie man manche dieser Eigenschaften gut dazu verwenden konnte, um die Wellenlänge bei einem Lichtstrahl wirklich zu bestimmen. Wie wir schon vermuteten, sind die Lichtwellenlängen recht klein, sie sind aber bei allen Lichtarten, die unser Auge zu sehen vermag, einander sehr ähnlich und liegen immer zwischen 0,0004 und 0,0008 mm. Das Licht einer bestimmten Wellenlänge sehen wir immer in einer bestimmten Farbe, wir empfinden z. B. Licht mit der Wellenlänge 0,0007 mm als dunkles Rot, 0,0006 als Gelb und so geht es weiter in der Reihenfolge der Regenbogenfarben über grün, blau nach violett, dem die Wellenlänge von 0,0004 mm entspricht. Im gewöhnlichen weißen Tageslicht sind alle diese Wellenlängen und damit alle entsprechenden Farben enthalten. Damit wir uns eine Vorstellung von der Größe der Lichtwellenlängen machen können, sei erwähnt, daß die Wellenlänge des grünen Lichtes mit etwa $^1/_{2000}$ mm noch 20mal kleiner ist als die Dicke der Aluminiumfolie, die unter dem Namen Silberpapier zum Einwickeln von Zigaretten usw. verwendet wird und sogar rund 100mal kleiner als die Stärke von Dünndruckpapier.

2. Interferenz von Wellen

Eine besonders wichtige Folge der Wellennatur der Lichtstrahlen ist die Tatsache, daß sich zwei Strahlen der gleichen Farbe und damit der gleichen Wellenlänge unter Umständen gegenseitig auslöschen können, daß also Licht zu Licht gebracht Dunkelheit ergeben kann. Man kann diese als Interferenz bezeichnete Erscheinung am leichtesten bei einer anderen Art von Wellen beobachten, die für unser Leben eine ebenso wichtige Rolle spielen, nämlich den Schallwellen, durch die Sprache, Töne und Geräusche an unser Ohr getragen werden. Die Schallwellen bestehen in regelmäßig abwechselnden Verdichtungen und Verdünnungen der Luft, ihre Wellenlänge bestimmt die Tonhöhe des Schalls, ähnlich wie die Lichtwellenlänge die Farbe des Lichtes bedingt. Lassen wir nun den

von einer Schallquelle z. B. einer Stimmgabel ausgehenden Ton in einem O-förmigen Rohr vom Punkte A auf zwei verschiedenen Wegen zu unserem Ohr (Punkt B) laufen (Abb. 6), und richten wir das Rohr so ein, daß wir den oberen Weg (über C) durch einen posaunenartigen Bogen in seiner Länge verändern können, so hören wir den Stimmgabelton an der Öffnung B abwechselnd laut und sehr leise, wenn wir den Bogen langsam herausziehen oder hineinschieben. Je nach dem Unterschied der Länge des oberen und des unteren Weges können nämlich die beiden bei A nach oben und unten auseinandergehenden Wellen bei B so wieder zusammentreffen, daß gerade ihre dichten und damit auch ihre dünnen Stellen zusammenfallen, oder z. B. so, daß die dichten Stellen der einen Welle immer auf die dünnen der anderen kommen. Im ersten Fall wird dann der Gegensatz zwischen Verdichtung und Verdünnung verstärkt, und wir hören daher einen lauteren Ton, im zweiten aber entsteht überall eine gleichmäßige Dichte der Luft, es ist keine Welle mehr vorhanden, und wir können daher nichts mehr hören.

Abb. 6. Die Quinckesche Posaune als Interferenzapparat

Bei den Lichtwellen kommt die entsprechende Erscheinung in der Natur ziemlich häufig vor. Das bunte, gestreifte Aussehen der Ölflecke, die wir bei feuchtem Wetter auf allen von Autos befahrenen Straßen bemerken können, und die bunten Farben der Seifenblasen kommen z. B. infolge der Interferenz der Lichtwellen zustande. Sowohl bei der Ölhaut auf der nassen Straße wie bei der Seifenblase haben wir es mit einer sehr dünnen durchsichtigen Schicht zu tun. Von dem Licht, das auf eine solche Schicht fällt, wird nun ein Teil an der Vorderseite, ein anderer Teil an der Rückseite der Schicht reflektiert; das an der Rückseite reflektierte Licht muß aber einen etwas längeren Weg zurücklegen, bis es in unser Auge gelangt, als das vorn reflektierte. Wir haben also jetzt den gleichen Fall wie vorhin bei den Schallwellen, die auch auf verschieden langen Wegen zu unserem Ohr laufen mußten. Aus dem weißen Tageslicht, das sehr viele verschiedene Lichtwellenlängen enthält, wird die zu der Dicke der Schicht passende Wellenlänge und Farbe durch diese Interferenzerscheinung ausgelöscht, und es bleiben nur die übrigen Farben, die aber unser Auge nicht einzeln, sondern nur als eine Mischfarbe sieht. Nimmt man z. B. rot heraus, so bleibt grün übrig, nimmt man orange weg, so bleibt blau. Man nennt je zwei Farben, die in dieser Art zusammen weißes Licht ergeben, zu einander komplementär; die Nebeneinanderstellung solcher Komplementärfarben empfinden wir übrigens meist als wohltuend, und wir können das nun als in der Natur des Lichtes begründet verstehen.

Daß uns dünne Schichten nun im allgemeinen nicht einfarbig, sondern bunt erscheinen, liegt natürlich daran, daß sie nicht gleichmäßig dick sind und daher an

verschiedenen Stellen verschiedene Farben auslöschen und in den entsprechenden Komplementärfarben gesehen werden. Wir können also aus der Farbe einen Schluß auf die Dicke der Schicht ziehen. Umgekehrt ist es aber bei bekannter Dicke der Schicht möglich, die zu einer Farbe gehörige Wellenlänge zu bestimmen, und darin liegt für den Physiker die Bedeutung der Interferenzerscheinungen. Auch für die oben betrachtete Verbreiterung des Lichtes hinter einer sehr schmalen Öffnung und die dort erwähnten Nebenaufhellungen ist die Interferenz der Lichtstrahlen verantwortlich, die von verschiedenen Stellen der Öffnung kommen; daher kann man auch diese sogenannten Beugungserscheinungen zu Wellenlängenbestimmungen benutzen. Man verwendet dann aber praktisch nicht eine einzelne Öffnung, sondern sogenannte Beugungsgitter; das sind Glasplatten, in die außerordentlich zahlreiche sehr feine Linien parallel nebeneinander eingeritzt sind, so daß bis zu 1000 auf einen Millimeter kommen. Das von den einzelnen Gitteröffnungen zwischen je zwei Strichen herkommende Licht einer einzelnen Wellenlänge verläßt diese Öffnung in einem weit geöffneten Büschel infolge der großen Feinheit dieser Öffnung. Die vielen von den einzelnen Öffnungen kommenden Büschel überdecken sich. Infolgedessen gibt es Richtungen, in denen sich Strahlen dieser Büschel gegenseitig verstärken; in anderen Zwischenrichtungen vernichten sie sich gegenseitig. Ist die Zahl der Striche genügend groß, dann sind die Bereiche, in denen kein nennenswertes Licht auftritt, weit ausgedehnt, und es bleiben nur einzelne scharf begrenzte Richtungen, in denen Licht beobachtet werden kann. Aus dem Winkel, den eine solche ausgezeichnete Richtung mit dem ursprünglichen Strahl bildet, und dem Abstand der Gitterstriche voneinander kann die Wellenlänge des Lichtes mit sehr großer Genauigkeit berechnet werden. Im übrigen braucht das Licht zur Hervorbringung des beschriebenen Effektes nicht gerade durch eine geritzte Glasplatte hindurchzugehen, man kann es auch von einem geritzten Spiegel reflektieren lassen.

Man hat so z. B. gefunden, daß das gelbe Licht, das von einer Flamme ausgestrahlt wird, wenn wir etwas Kochsalz in sie hineinbringen, aus zwei gelben Lichtarten mit den Wellenlängen 0,0005890 und 0,0005896 mm besteht; die Wellenlängen unterscheiden sich hier also nur um 1‰. Man kann aber mit den besten Apparaten heute sogar noch ungefähr 1000mal kleinere Wellenlängenunterschiede feststellen: die Wellenlängenbestimmung gehört zu den genauesten Messungen, die im ganzen Gebiet der Physik möglich sind. Die außerordentliche Genauigkeit, mit der solche Messungen bei geeigneter Lichtquelle ausführbar sind, hat dazu geführt, unser Grundlängenmaß, das Meter, welches durch einen sorgfältig aufbewahrten Platinmaßstab festgelegt ist, dadurch zu kennzeichnen, daß angegeben wird, wieviele Wellenlängen eines genau bestimmten Lichtes auf ein Meter entfallen.

3. Die Polarisation des Lichtes

Wir können aber von den Lichtwellen noch mehr erfahren als nur die Größe ihrer Wellenlänge. Das nächste Bild (Abb. 7) zeigt uns eine sehr merkwürdige Erscheinung: wir sehen durch einen glasklar durchsichtigen Kristall hindurch die darunterliegende Schrift doppelt, die Buchstaben erscheinen je nach der Stellung des Kristalls etwas gegeneinander verschoben. Der Kristall, es ist eine in Island vorkommende Kalkspatart, hat also die Eigenschaft, jeden Strahl in zwei im allgemeinen gleich helle Strahlen aufzuspalten; er zeigt, wie man sagt, Doppelbrechung. Auch bei vielen anderen Kristallen kann man diese Doppelbrechung nachweisen, sie kommen aber selten in so schönen, durchsichtigen Stücken vor wie der isländische Doppelspat. Der französische Physiker Malus bemerkte nun zuerst im Jahre 1808, als er zufällig einmal das in einem Fenster des Palais Luxemburg in Paris gespiegelte Bild der untergehenden Sonne durch einen solchen Kalkspatkristall betrachtete, daß die beiden Sonnenbilder ganz verschieden hell waren, und daß sich ihre Helligkeit veränderte, wenn er den Kristall um die Achse seiner Blickrichtung drehte. Es sah also so aus, als ob in dem Strahl infolge seiner Reflexion an der Glasscheibe nicht mehr alle Richtungen, die in einer Querebene senkrecht zu seiner Achse lagen, gleichberechtigt wären.

Abb. 7. Doppelbrechung durch einen Kalkspatkristall
Aus Lecher, Lehrbuch der Physik

Die Erklärung, die man für diese Erscheinung gefunden hat, ist nun einfach die, daß in einem Lichtstrahl die Schwingungen immer senkrecht oder transversal zur Richtung des Strahles, d. h. zur Fortpflanzungsrichtung des Lichtes erfolgen, genau so wie sich in einer Wasserwelle die einzelnen Wasserteilchen nur auf- und abwärts bewegen, während die Welle selbst sich senkrecht dazu, nämlich horizontal ausbreitet. Bei einem Lichtstrahl gibt es nun aber immer viele Richtungen, die senkrecht zum Strahl liegen (man denke an die Speichen eines Rades, die alle senkrecht auf der Radachse stehen), und im gewöhnlichen (natürlichen) Licht erfolgen die Schwingungen auch tatsächlich in den verschiedensten dieser Richtungen in sehr schnellem Wechsel hintereinander. Es läßt sich aber auf verschiedene Weise, z. B. durch die eben erwähnte Reflexion an einer Glasscheibe, erreichen, daß die Lichtschwingungen nur noch in einer Richtung, bei horizontalem Strahl, z. B. in senkrechter Richtung erfolgen, und man nennt dann das Licht „polarisiert“. Der Kalkspat und viele andere Kristalle tun uns nun den Gefallen, das hindurchfallende Licht zu polarisieren; in den beiden Strahlen, in die sie einen einfallenden Strahl zerlegen, erfolgen nämlich die Lichtschwingungen je in einer bestimmten Richtung und zwar steht die Schwingungsrichtung des einen Strahles senkrecht auf der des anderen. Nur wenn das einfallende Licht unpolarisiertes, gewöhnliches

Licht ist, in dem alle Schwingungsrichtungen vorkommen, können die beiden Strahlen, die aus ihm entstehen, immer gleich hell werden; ist es dagegen irgendwie, z. B. durch Reflexion an einer Glasscheibe polarisiert, so können sie ganz verschiedene Helligkeit annehmen, ganz wie es Malus beobachtet hatte.

Die Betrachtung der Polarisierungserscheinungen hat uns somit zu dem wichtigen Ergebnis geführt, daß die Schwingungen in einer Lichtwelle senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung erfolgen. Dieses Resultat ist nicht so selbstverständlich, wie man im Hinblick auf die ebenfalls transversal schwingenden Wasserwellen denken könnte. Denn bei den oben schon erwähnten Schallwellen, mit denen man die Lichtwellen im Anfang der Wellentheorie des Lichtes viel lieber vergleichen wollte, bewegen sich die Luftteilchen in einer ganz anderen Weise, sie schwingen nämlich immer in Richtung der Wellenausbreitung oder, wie man sagt, *longitudinal*. Der Schall muß sich zwar nicht unbedingt in longitudinalen Wellen fortpflanzen, in festen Körpern, z. B. einer langen Eisenstange, läuft ein Schlag, den wir auf das eine Ende geben, als transversale Schwingung hindurch, und wird dann am anderen Ende hörbar. In der Luft und im Innern von Flüssigkeiten erfolgt aber die Schallausbreitung stets in longitudinalen Wellen.

4. Natur des Lichtes (Elektromagnetische Lichttheorie)

Wir merken nun, daß die Frage, ob uns für die Lichtwellen eine transversale oder eine longitudinale Schwingung natürlicher erscheint, eng mit einer Frage zusammenhängt, um die wir uns bisher noch ängstlich herumgedrückt haben, nämlich der Frage, was es denn nun eigentlich ist, das in einer Lichtwelle schwingt. Daß es nicht die Luft sein kann, geht schon aus der Tatsache hervor, daß sich die Lichtwellen als Strahlen der Sonne ja durch den luftleeren Weltenraum ausbreiten, und die Transversalität der Lichtwellen zeigt nun weiter, daß eine Lichtwelle der Wellenausbreitung in einem dünnen Gas, die immer wie die Schallfortpflanzung in Luft longitudinal erfolgt, überhaupt nicht ähnelt. Man führte daher einen besonderen Stoff ein, den man als Lichtäther bezeichnete, der den ganzen Weltenraum erfüllen sollte und auch alle lichtdurchlässigen Körper durchdringen mußte, und den man im übrigen noch mit allen denjenigen Eigenschaften versah, die nötig waren, damit die ihm zugesprochenen Schwingungen sich wie die Lichtschwingungen verhielten. Diese Eigenschaften des Äthers ergaben sich nun aber vom Standpunkt unserer Erfahrungen mit den materiellen Körpern als recht widerspruchsvoll und unwahrscheinlich. So war die aus astronomischen Messungen und Laboratoriumsversuchen folgende außerordentlich große Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes (300000 km/Sek.) nur verständlich, wenn der hypothetische Äther, obgleich er doch alles durchdringen sollte, als ganz außerordentlich hart angesehen wurde.

Gerade die Lichtgeschwindigkeit wurde nun aber zum Ausgangspunkt für eine

neue Theorie, die die Annahme elastischer Ätherschwingungen in der bisherigen Form überflüssig machte. C. Maxwell fand im Jahre 1873 bei theoretischen Arbeiten an der Theorie der Elektrizität und des Magnetismus, in Weiterverfolgung der Ideen von M. Faraday, daß es elektromagnetische Schwingungen geben müsse, die sich mit derselben großen Geschwindigkeit wie das Licht im Raum ausbreiten. Die Existenz dieser Wellen wurde dann von H. Hertz nachgewiesen und ihre Geschwindigkeit wirklich zu etwa 300000 km in der Sekunde gefunden, es sind im wesentlichen die uns heute so wohl bekannten Rundfunkwellen. Maxwell vermutete nun wegen der Übereinstimmung der beiden Geschwindigkeiten, daß auch die Lichtwellen elektromagnetische Wellen mit sehr kleiner Wellenlänge seien und begründete damit die sogenannte elektromagnetische Lichttheorie, die sich für die weitere Erforschung vieler Strahlungsarten als außerordentlich fruchtbar erwiesen hat. Wir wissen heute, daß es außer den Rundfunkwellen, deren Wellenlänge viel größer ist als die der Lichtwellen, auch Strahlen gibt, deren Wellenlängen weit unter denen der Lichtwellen liegen, ja, es sind uns Strahlen aller Wellenlängen bekannt: angefangen bei etwa 1 Millionstel der Wellenlänge des Lichtes bis hinauf zu Wellenlängen von vielen Kilometern, und alle diese Strahlen haben die gemeinsame Ausbreitungsgeschwindigkeit von 300000 km/Sek.

Ehe wir uns nun die Eigenschaften dieser verschiedenen Strahlenarten genauer betrachten, müssen wir uns noch etwas darüber klar werden, was wir uns unter der Bezeichnung: elektromagnetische Welle denken sollen. Jeder hat wohl schon einmal gesehen, daß von einer Metallkugel, die von einer Elektrisiermaschine oder einer Influenzmaschine elektrisch aufgeladen wurde, kleine geladene Kügelchen angezogen oder abgestoßen werden. Wir reden dann von einer elektrischen Kraft, die von der Metallkugel ausgeht und die kleineren Kügelchen zu verschieben sucht. Ebenso kennen wir magnetische Kräfte, denn unsere Kompaßnadeln werden ja von einer überall auf der Erde ungefähr in der Nordsüdrichtung wirkenden magnetischen Kraft in ihre Richtung hineingedreht. Solche elektrische und magnetische Kräfte, die sich von den Kräften der eben genannten Beispiele nur dadurch unterscheiden, daß sie in andauerndem schnellen Wechsel ihre Richtung ändern, sind nun in jeder elektromagnetischen Welle vorhanden, und sie sind auch das einzige, was das Wesen dieser Wellen ausmacht. Ein elektrisch geladenes Kügelchen müßte also von einer solchen Welle in eine rasche Schwingung versetzt werden; nur sind alle geladenen Teilchen, die wir noch mit bloßem Auge sehen können, viel zu schwer und zu träge, als daß sie z. B. auch von einer Radiowelle noch in Bewegung gebracht werden könnten, denn die elektrische Kraft schwingt in einer solchen Welle, wie sie von den Rundfunksendern ausgestrahlt wird, ungefähr 1 millionmal in einer einzigen Sekunde hin und her. Wohl aber vermag die Kraft der Rundfunkwelle die Elektronen in unserer Antenne in Bewegung zu versetzen, und wir bekommen so in unserem Empfangsapparat einen elektrischen Strom, der seine Richtung in jeder Sekunde 1 millionmal wechselt. Je kürzer nun die Wellen-

länge einer elektromagnetischen Strahlung ist, um so schneller erfolgen die elektrischen und magnetischen Schwingungen in den betreffenden Wellen und desto schwerer wird es, mit elektrischen Mitteln die Existenz dieser Schwingungen nachzuweisen. Es ist daher verständlich, daß man die elektromagnetische Natur der Lichtwellen, bei denen schon mehrere hundert Billionen Schwingungen auf die Sekunde kommen, erst so spät erkannt hat.

5. Elektrische Wellen

Wir wollen uns nun im folgenden etwas genauer mit den Strahlen der verschiedenen Wellenlängen beschäftigen und verwenden dabei zur Orientierung die Abbildung 8. Wir haben hier eine Wellenlängenskala aufgezeichnet, bei der die Wellenlänge von einem Punkt zum nächsten jedesmal auf den zehnfachen Betrag ansteigt und daneben angegeben, als was die Strahlen der betreffenden Wellenlängen in der Natur vorkommen. Lichtwellenlängen werden gewöhnlich nicht in Millimetern, sondern in tausendstel Millimetern gemessen, wobei man für ein tausendstel Millimeter die Abkürzung μ benutzt. Noch häufiger wird in neuerer Zeit als Einheit das Å (Ångström) verwendet. Ein Å ist gleich ein hundertmillionstel Zentimeter und die Benennung ist erfolgt nach dem Namen eines für die Spektralanalyse sehr verdienten Beobachters. Das Ångström ist deshalb eine natürliche Einheit, weil seine Größe ungefähr mit dem Durchmesser der Atome übereinstimmt.

Abb. 8. Übersicht über die elektromagnetischen Strahlungen aller Wellenlängen

Wir sehen, daß auf der Seite der langen Wellen ein sehr großer Bereich mit Wellenlängen von etwa 30 km bis hinab zu $^1/_{10}$ mm von den elektrischen Wellen ausgefüllt wird, d. h. von den Wellen, die sich wie die Rundfunkwellen mit rein elektrischen Apparaten erzeugen und nachweisen lassen. Der großen Verschiedenheit in den Wellenlängen der elektrischen Schwingungen entsprechen auch manche Unterschiede in ihrer Entstehung und ihren Eigenschaften. Für den normalen Rundfunkbetrieb sind nur die Wellenlängen zwischen 100 m und etwa 1500 m im Gebrauch; die langen Wellen bis hinauf zu etwa 20 km und die Kurzwellen der Wellenlängen zwischen 20 m und 100 m, die für die Ferntelegraphie und Ferntelephonie verwendet werden, haben aber in ihrem Verhalten mit den Rund-

funkwellen vieles gemeinsam. Alle diese Wellen werden heute praktisch mit Hilfe sogenannter Elektronenröhren erzeugt, die sich von den Röhren unserer Rundfunkempfänger nur durch ihre Größe und Leistungsfähigkeit unterscheiden, und sie alle haben auch die für die Fernübertragung so wichtige Eigenschaft, daß sie um die Erde herumlaufen können, was die Lichtstrahlen nicht fertigbringen. Die Radiowellen pflanzen sich nämlich besonders gern längs einer die Elektrizität gut leitenden Schicht fort, und da die Erde den elektrischen Strom recht gut zu leiten vermag, machen die Wellen bei ihrer Ausbreitung die Krümmung des Erdballs mit. Wie sich in den letzten Jahren herausgestellt hat, existiert aber auch in den größten Höhen unserer Atmosphäre, etwa 90 km über dem Erdboden, eine weitere gut leitende Schicht, die von sehr kleinen dort vorhandenen elektrisch geladenen Teilchen gebildet wird, und diese Schicht (Heavisideschicht) verhindert, daß die Wellen weiter in den Weltenraum hinauslaufen, und sorgt ebenfalls dafür, daß sie in der Nähe der Erdoberfläche festgehalten werden. Diese Verhältnisse sind für die Zwecke der Nachrichtenübertragung recht günstig, denn die Wellen bleiben auf eine im Verhältnis zum Erddurchmesser sehr schmale Schale konzentriert und sind deshalb in großen Entfernungen vom Sender leichter zu empfangen, als wenn sie sich nach allen Raumrichtungen gleichmäßig zerstreuen könnten. Noch besser wäre es natürlich für den Verkehr zwischen zwei bestimmten Punkten, etwa zwischen Berlin und Neuyork, wenn man die Energie der Wellen in einem schmalen Strahl hinüberschicken könnte, und bis zu einem gewissen Grade ist das bei den Kurzwellen heute auch möglich, die also in dieser Hinsicht den langen überlegen sind. Man verwendet dazu im Kurzwellenbetrieb sogenannte Richtstrahlantennen, bei denen viele Einzeldrähte gleichzeitig Wellen ausstrahlen, und sorgt dafür, daß sich alle Einzelwellen gerade in der gewünschten Richtung durch Interferenz gegenseitig verstärken, während sie sich in anderen Richtungen schwächen oder ganz auslöschen. Daß die Verwendung der Welleninterferenz, die wir oben beim Licht kennengelernt haben, bei den Kurzwellen leichter ist als bei den langen, werden wir verstehen, wenn wir uns erinnern, daß bei den Interferenzerscheinungen immer der Abstand der strahlenden Öffnungen, der hier dem Abstand der Einzelantennen entspricht, in seiner Größe der Wellenlänge ähneln muß. Für Wellen von 1km Wellenlänge und mehr läßt sich so etwas natürlich nicht durchführen.

Die an die Kurzwellen anschließenden Ultrakurzwellen mit Wellenlängen von einigen Metern bis hinab zu einigen Zentimetern fangen nun schon an, in einigen Eigenschaften den Lichtwellen ähnlicher zu werden; sie verlieren vor allem die Fähigkeit, der Erdkrümmung zu folgen, und breiten sich wie das Licht fast nur geradlinig aus. Trotz dieser für Übertragungen auf größere Entfernung sehr hinderlichen Tatsache interessiert man sich heute immer mehr für diese Wellen, weil sie bei den neuen Fernsehversuchen eine große Rolle spielen. Wir haben ja schon oben gesehen, daß die Schwingungen in einer Welle um so schneller vor sich gehen,

je kürzer die Wellenlänge ist, und eine außerordentlich rasche Folge der Einzelschwingungen ist für Fernsehübertragungen deshalb nötig, weil jedes einzelne Bild in sehr viele (bis zu 100000) Lichtpunkte zerlegt werden muß, die nach Verwandlung in elektrische Ströme nacheinander übertragen werden, und außerdem noch in jeder Sekunde etwa 25 verschiedene Bilder gesendet werden müssen, damit im Empfänger der kinoartige Eindruck des bewegten Bildes entsteht.

Die kürzesten elektrischen Wellen mit Wellenlängen von etwa $^1/_{10}$ mm bis zu 10 cm lassen sich heute noch nicht in befriedigender Weise mit Hilfe von Röhren erzeugen, sondern nur stoßweise durch elektrische Funken anregen. Im Anfang der Entwicklung der drahtlosen Telegraphie konnte man auch die Schwingungen mit großer Wellenlänge nur nach der Funkenmethode in einzelnen abgerissenen Wellengruppen hervorbringen, daran erinnern noch die Bezeichnungen: Funkentelegraphie und Rundfunk. Im übrigen ähneln die kürzesten elektrischen Wellen den Lichtwellen noch mehr als die Ultrakurzwellen, sie werden von Metallspiegeln reflektiert und lassen sich mit Hohlspiegeln von einigen Zentimetern Durchmesser in einem Brennpunkt konzentrieren. H. Hertz verwendete diese ganz kurzen Wellen bei seinen ersten Versuchen des Nachweises elektrischer Schwingungen; die einfachen Apparate, die ihm dabei zur Verfügung standen, sind im Deutschen Museum in München aufgestellt.

6. Ultrarote Strahlen

Schwingungen mit Wellenlängen, die kürzer sind als etwa 0,1 mm, lassen sich auf elektrischem Wege nicht mehr oder nur sehr schwer herstellen. Wir sehen aber aus unserer Wellenlängenskala, daß es hier Strahlen gibt, deren Wellenlängen zwischen denen der kürzesten elektrischen Wellen und den größten Lichtwellenlängen liegen. Man bezeichnet diese Strahlen als ultrarote Strahlen, weil ihre Wellenlänge noch größer ist als die der roten Strahlen, die ja von den Lichtstrahlen die größte Wellenlänge haben. Durch die Bezeichnung „ultrarot" bringt man aber gleichzeitig zum Ausdruck, daß man diese Strahlen vom Lichte herkommend kennengelernt hat; wir begegnen hier also zum erstenmal einer sehr lichtähnlichen Strahlung, die unser Auge doch nicht zu sehen vermag. Wie ist man nun dazu gekommen, von der Existenz des ultraroten Lichtes etwas zu erfahren?

Wenn wir das weiße Licht der Sonne oder einer anderen Lichtquelle durch ein dreieckiges Glasprisma fallen lassen, so wird es in die einzelnen Farben zerlegt, die in ihm enthalten sind. Wir erhalten ein Regenbogenband oder ein Spektrum, in dem die Farben in der Reihenfolge ihrer Wellenlängen angeordnet sind. Die langwelligen roten Strahlen liegen auf der einen Seite, sie werden vom Prisma am wenigsten abgelenkt, die kurzwelligen violetten liegen auf der anderen Seite mit der stärksten Ablenkung. Herschel beobachtete im Jahre 1800, daß ein Thermometer, dessen Quecksilberkugel er der Reihe nach in die verschiedenen Farben eines Sonnenspektrums brachte, sich im roten Teil des Spektrums besonders stark

erwärmte, und daß es auch dann noch eine stärkere Erwärmung anzeigte, wenn er es über das Rot hinaus an eine Stelle brachte, an der das Auge überhaupt kein Licht mehr bemerken konnte. Die Sonne schien hier also unsichtbare Strahlen auszusenden, die sich durch ihre Wärmewirkung verrieten und deren Wellenlänge noch größer zu sein schien als die des roten Lichtes. Wenn wir in einem dunklen Zimmer in die Nähe eines stark geheizten eisernen Ofens kommen, so fühlen wir die ausgestrahlte Wärme beinahe schmerzhaft im Gesicht, ohne doch von dieser Strahlung etwas sehen zu können. Halten wir aber einen Gegenstand, z. B. ein Stück Pappe zwischen uns und den Ofen, so hört die schmerzhafte Wirkung sofort auf. Es ist dies ein Zeichen dafür, daß nicht etwa die Luft in der Nähe des Ofens so unangenehm heiß ist, sondern daß wirklich unsichtbare Strahlen von ihm ausgehen, die wir mit der Pappe abschirmen können. Wird der Ofen noch etwas mehr geheizt, so fängt er an, dunkelrot zu glühen, sendet also nunmehr außer den unsichtbaren auch sichtbare Strahlen aus und zwar zunächst rote Strahlen, und das läßt uns wieder vermuten, daß die unsichtbaren Strahlen, die wir vorher fühlten, noch jenseits des Rot liegen.

Durch die genaue Erforschung der von einem erhitzten Körper ausgehenden Strahlung mit Hilfe der durch geeignete Gitter hervorgebrachten Interferenzen hat man erfahren, daß von ihm ultrarote Strahlen mit Wellenlängen bis hinauf zu einigen zehntel Millimeter in meßbarer Stärke ausgesendet werden, daß man also Wellen von ungefähr 0,3 mm Wellenlänge sowohl auf elektrischem Wege als sehr kurze elektrische Wellen wie durch Heizung eines Körpers als sehr lange ultrarote Wellen herstellen kann. Zum Nachweis der ultraroten Strahlen verwendet man fast nur die von ihnen ausgehende Wärmewirkung; man kann dazu aber natürlich nicht mehr ein gewöhnliches Quecksilberthermometer gebrauchen, sondern arbeitet mit außerordentlich empfindlichen elektrischen Thermometern, die noch Temperaturänderungen von 1 millionstel Grad anzeigen. Es ist übrigens durchaus möglich, daß ein Körper, der im gewöhnlichen Licht schön durchsichtig ist, gewisse ultrarote Strahlen überhaupt nicht durchläßt und umgekehrt. So lassen fast alle Glasarten das sichtbare Licht vollkommen durch, absorbieren aber ultrarote Strahlen mit Wellenlängen über 2,5 μ sehr stark, während wieder Ebonit, das wir als eine schwarze lichtundurchlässige Substanz kennen, für längere ultrarote Strahlen ziemlich „durchsichtig" ist.

7. Sichtbares Licht

Wir konnten es durch Erhitzung unseres Metallofens zustande bringen, daß er zunächst unsichtbare ultrarote und dann bei Erreichung einer höheren Temperatur dunkelrote Strahlen aussandte. Wir wissen nun, daß das Glühen eines Metallstückes bei ständig weiterem Heizen immer heller und seine Farbe immer weißer wird, gleichzeitig wird auch die ausgestrahlte Wärme immer mehr fühlbar. Das

sichtbare Licht entsteht also auf genau die gleiche Weise wie das ultrarote durch die Ausstrahlung eines heißen Körpers, aber erst bei sehr viel höheren Temperaturen wird es merklich. Bei wachsender Temperatur werden dabei immer kürzere Wellenlängen ausgestrahlt, das grüne Licht entsteht erst bei höheren Temperaturen als das rote, das blaue wieder bei höheren als das grüne. Wenn die Temperatur so hoch ist, daß auch blaues und violettes Licht genügend stark auftritt, dann erscheint uns der strahlende Körper weiß, weil er dann alle Farben zugleich aussendet. Fast alles Licht, das wir verwenden, kommt von in heller Glut befindlichen Körpern: das Licht der Gas- und Kerzenflammen von winzigen darin glühenden Kohleteilchen, das Licht der Glühbirne von dem auf Weißglut erhitzten Wolframfaden, das Licht der Bogenlampe von der in hellster Weißglut strahlenden Kohle und endlich das Sonnenlicht von einem Körper, dessen Temperatur die aller irdischen Lichtquellen übertrifft (6000°). Daß die sichtbaren Strahlen ebenso gut wie die ultraroten in starkem Maße die Fähigkeit haben, einen Gegenstand, den sie zu absorbieren vermögen, zu erwärmen, fühlen wir alle häufig im täglichen Leben und erkennen es auch aus dem oben beschriebenen Versuch von Herschel, der ja auch in sichtbaren Teilen des Spektrums eine Erwärmung seines Thermometers feststellte. Bei den ultraroten Strahlen tritt die Eigenschaft, Wärme mit sich zu führen, nur besonders deutlich hervor, weil sie bei ihnen die einzige Möglichkeit zu ihrem Nachweis bildet und weil alle heißen Körper, die noch nicht bis zum Glühen erhitzt sind, im wesentlichen nur ultrarotes Licht aussenden.

8. Ultraviolette Strahlen

Die Sonne schickt uns nun aber außer dem sichtbaren Licht und den ultraroten Strahlen noch eine andere Art von Strahlen zu, deren Wirkung wir besonders stark im Gebirge empfinden: die Sonne bräunt oder rötet dort unsere Haut stark, ja, wir können auf Gletschern in einer Höhe von mehr als 2000 m schon in kurzer Zeit regelrechte Verbrennungen mit Fiebererscheinungen bekommen. Die Strahlen, die wir dafür verantwortlich machen müssen, haben eine kleinere Wellenlänge als das sichtbare Licht, sie liegen im Spektrum jenseits seiner violetten Grenze, wir nennen sie daher ultraviolett. Daß es in diesem Wellenlängengebiet wirklich noch Strahlen gibt, weisen wir am einfachsten wieder an dem mit einem Prisma zerlegten Sonnenlicht nach. Machen wir nämlich eine photographische Aufnahme des Sonnenspektrums auf einer gewöhnlichen Platte, so finden wir, daß jenseits der violetten Grenze des Spektrums die Platte fast mehr geschwärzt ist als im blauen und violetten und viel mehr als im gelben oder roten Gebiet. Die ultravioletten Strahlen, die durch diesen Versuch ihre Existenz verraten, haben also die Eigenschaft, die photographische Platte stark zu schwärzen, und wir haben damit gleich ein sehr bequemes Hilfsmittel zur Erforschung dieser Strahlen kennen gelernt. Jeder Liebhaberphotograph weiß ja genau, daß die photographische Emp-

findlichkeit im roten Licht viel geringer ist als im blauen; es ist daher auch nur mit Mühe möglich, Platten für die allerkürzesten ultraroten Strahlen (bis 1,2 μ) noch etwas empfindlich zu machen, im allgemeinen aber ist die Photographie im Ultrarot ganz unbrauchbar. Immerhin haben Platten, die für den roten Teil des Spektrums empfindlich gemacht worden sind, schon eine praktische Bedeutung bekommen. Jeder hat in illustrierten Zeitungen schon die wundervoll klaren Aufnahmen bemerkt, welche von weit entfernten Bergen mit Hilfe solcher Platten gemacht werden können. In gewöhnlichen Aufnahmen wird die Fernsicht durch eine bläulich leuchtende Dunstschicht verschleiert, die bei den rot empfindlichen Platten nicht mehr zur Wirkung kommt. Für das Ultraviolett dagegen und alle Strahlen mit noch kürzeren Wellenlängen, zu denen wir noch kommen werden, läßt sich die photographische Methode immer ohne weiteres anwenden.

Das Sonnenspektrum, das wir mit unserem Glasprisma aufgenommen haben, reicht im Ultravioletten etwa bis zu 0,350 μ Wellenlänge, also nicht allzu weit über die sichtbare Grenze (etwa 0,400 μ) hinaus. Man könnte daher glauben, daß Strahlen mit noch kürzeren Wellenlängen im Sonnenlicht nicht enthalten sind. Ersetzen wir aber das Glasprisma und die Linsen unseres Spektrographen (so nennt man einen Apparat zum Photographieren der Spektren) durch solche aus Quarz, so werden unsere Aufnahmen bis ungefähr 0,290 μ Wellenlänge geschwärzt. Außerdem finden wir, wenn wir den gleichen Versuch auf einem hohen Berg wiederholen, daß jetzt der ultraviolette Teil des Spektrums im Verhältnis zum sichtbaren viel stärker herauskommt und sich auch etwas weiter nach den kurzen Wellen hin erstreckt. Wir ersehen daraus zunächst, daß Glas für Strahlen mit Wellenlängen unter 0,350 μ nicht mehr durchlässig ist, und merken weiter, daß Wellenlängen unter 0,290 μ auch durch unsere Atmosphäre nicht mehr durchzudringen vermögen. In größeren Höhen, wo die über uns liegende Luftschicht dünner geworden ist, sind die ultravioletten Strahlen noch nicht so stark absorbiert, daher ist dort auch die von ihnen verursachte Verbrennung der Haut so sehr viel stärker. Da Sonnenstrahlen unter 0,290 μ Wellenlänge durch die Lufthülle nicht mehr hindurchkommen, müssen wir uns nach einer anderen Lichtquelle umsehen, wenn wir noch kurzwelligere Strahlen untersuchen wollen. Hier hilft uns nun die Quarzquecksilberlampe weiter, die von den Ärzten als künstliche Höhensonne zur Erzeugung von ultraviolettem Licht verwendet wird und heute auch für die Straßenbeleuchtung eine Rolle spielt. Sie besteht aus einem luftleeren Quarzrohr, in dem Quecksilberdampf auf elektrischem Wege zum hellen Leuchten gebracht wird. Wir werden diesen Vorgang, auf dem auch das Leuchten der Lichtreklameröhren in den Straßen der Städte beruht, später noch besser verstehen lernen. Das Spektrum des Lichtes einer solchen Quecksilberlampe enthält nicht wie das Sonnenspektrum Farben aller Wellenlängen, sondern es besteht nur aus einzelnen hellen Linien, die sich aber, und das ist für uns jetzt wichtig, weit ins Ultraviolette erstrecken (Abb. 9). Man kann mit Hilfe der Quecksilberlampe Strahlen bis zu etwa 0,200 μ Wellenlänge

photographieren, dann aber ergeben sich neue Schwierigkeiten, weil sowohl der Quarz als auch die kurze Luftstrecke zwischen Lampe und Platte und auch die Gelatine der Platte selbst noch kurzwelligere Strahlen bald nicht mehr durchlassen. Es ist trotzdem gelungen, durch Verwendung von luftleer gepumpten Spektrographen mit Prismen und Linsen aus Flußspat und weiter, nachdem auch Fluß-

Abb. 9. Spektrum der Quarzquecksilberlampe (Wellenlängen in Ångströmeinheiten)
(Aus Müller-Pouillet, Lehrbuch der Physik)

spat unter 0,100 μ nichts mehr durchläßt, mit Hilfe von Reflexionsbeugungsgittern bis zu Wellenlängen von etwa 0,013 μ vorzustoßen. Als Lichtquelle diente bei diesen Versuchen ein ebenfalls im Vakuum überspringender elektrischer Funke; als Platten verwendet man gelatinelose Platten, die zuerst von V. Schumann, dem wir den ersten Vorstoß in das kurzwellige Ultraviolettgebiet verdanken, eingeführt wurden. Wir haben ja schon auf Seite 6 erwähnt, daß das Beugungsgitter Licht verschiedener Wellenlängen in verschiedenen Richtungen ablenkt, also ebenso wie ein Prisma ein Spektrum erzeugt, dazu hat das Gitter noch den Vorteil, daß es gleichzeitig zum Messen der Wellenlänge benutzt werden kann. Alle Wellenlängenbestimmungen im sichtbaren, ultraroten und ultravioletten Gebiet sind mit Beugungsgittern durchgeführt worden.

Eine Eigenschaft der ultravioletten Strahlen, die ebenfalls zu ihrem Nachweis verwendet werden kann, muß noch erwähnt werden. Es gibt nämlich viele Substanzen: bestimmte Glasarten, Flüssigkeiten und Salze, die ein meist bläuliches oder grünliches Licht aussenden, wenn sie von ultravioletten Strahlen getroffen werden. Bei dieser als Fluoreszenz bezeichneten Erscheinung bewirkt also das unsichtbare ultraviolette Licht das Entstehen von sichtbarem Licht, und wir können daher, wenn wir eine solche fluoreszierende Substanz in den ultravioletten Teil des Spektrums halten, sofort erkennen, ob ultraviolette Strahlen vorhanden sind und wie intensiv sie sind. Die Fluoreszenz wird manchmal benutzt, um Einzelheiten erkennbar zu machen, die im gewöhnlichen Licht nicht hervortreten, und spielt in diesem Zusammenhang gelegentlich eine Rolle in der gerichtlichen Medizin.

9. Röntgenstrahlen

Im Jahre 1895 machte nun der Würzburger Physiker W. C. Röntgen die Entdeckung, daß es außer den ultravioletten Strahlen noch eine andere Strahlenart geben müsse, die ebenfalls einen mit einer fluoreszierenden Substanz bestri-

chenen Schirm zum Aufleuchten bringt. Er war damals damit beschäftigt, die Eigenschaft von elektrisch geladenen Teilchen zu untersuchen, die in einer mit sehr stark verdünnter Luft gefüllten Glasröhre auftraten, wenn man eine große elektrische Spannung an die durch das Glas geschmolzenen Zuführungen legt. Röntgen fand nun, daß von allen den Stellen der Glaswand der Röhre, die von diesen Teilchen (sie werden uns im nächsten Abschnitt noch sehr interessieren) getroffen wurden, eine unsichtbare Strahlung ausging, die seinen Fluoreszenzschirm grün aufleuchten ließ. Das außerordentlich Erstaunliche an dieser Entdeckung war aber, daß dieses Aufleuchten auch dann nicht aufhörte, wenn er die ganze Röhre mit schwarzem Karton umhüllte, ja, daß die von der Röhre offenbar ausgehende Strahlung sogar durch Holz und dünne Metallbleche hindurch noch Fluoreszenz hervorrufen konnte. Diese geheimnisvolle Durchdringungsfähigkeit der neuen Strahlen, die man bald nach ihrem Entdecker als Röntgenstrahlen bezeichnete, unterscheidet sie wesentlich von allen Strahlenarten, die wir bisher kennengelernt haben, denn selbst die Radiowellen, die durch viele den elektrischen Strom nicht leitende Substanzen auch recht gut durchzudringen vermögen, werden durch jedes Metall vollkommen abgeschirmt.

Gewisse Anzeichen sprachen nun zwar dafür, daß auch die Röntgenstrahlen ebenso wie das Licht und die elektrischen Wellen eine elektromagnetische Wellenstrahlung seien, und die Ähnlichkeit einiger ihrer Eigenschaften mit denen der ultravioletten Strahlen ließ vermuten, daß ihre Wellenlänge dann wohl auch sehr klein sein würde. Denn außer der Erzeugung von Fluoreszenz haben die Röntgenstrahlen mit den ultravioletten auch die Wirkung auf die photographische Platte gemeinsam, die ja bei der medizinischen Verwendung der Röntgenstrahlung für Innenaufnahmen des Körpers eine so große Rolle spielt. Trotzdem gelang es zunächst viele Jahre lang nicht, die Wellennatur der Röntgenstrahlen nachzuweisen, weil die bei allen Wellenstrahlungen vorhandenen Erscheinungen der Reflexion, Brechung, Beugung und Interferenz bei ihnen nicht gefunden werden konnten. War die Wellenlänge der Röntgenstrahlen nun aber wirklich sehr klein, noch viel kleiner als die der ultravioletten Strahlen, so war das Mißlingen dieser Versuche noch kein Beweis gegen die Welleneigenschaft der Strahlen. Denn wir haben uns ja klar gemacht, als wir zuerst die Wellennatur des Lichtes erkannten, daß man Interferenzerscheinungen nur dann bekommt, wenn die verwendeten Öffnungen, also z. B. der Abstand zweier benachbarter Striche beim Beugungsgitter, nicht allzuviel größer ist als die Wellenlänge der Strahlen. Die feinsten Beugungsgitter, die wir herstellen können, haben nun aber einen Strichabstand von etwa $^1/_{1000}$ mm (1 μ), entsprechend etwa der Wellenlänge des roten Lichtes, und wir können daher gar nicht erwarten, mit ihrer Hilfe noch bequem beobachtbare Interferenzerscheinungen zu bekommen, wenn die Wellenlänge der Röntgenstrahlen etwa noch viel kleiner ist als die des ultravioletten Lichtes.

In dieser Schwierigkeit kam nun im Jahre 1912 M. v. Laue auf eine hervor-

ragende Idee, die den Wert guter theoretischer Überlegungen deutlich zeigt, ebenso wie die Entdeckung Röntgens ein Musterbeispiel für die Bedeutung systematischer experimenteller Forschung war. Es galt ja damals schon allgemein als sicher, daß jeder Stoff, sei es nun ein Gas, eine Flüssigkeit oder ein fester Körper, aus sehr kleinen Teilchen, den Atomen zusammengesetzt ist, von denen man etwa 90 verschiedene Arten kennengelernt hatte. Die große Zahl und Verschiedenheit der einzelnen Stoffe erklärt sich, wie die Forschungen der Chemie zeigten, dadurch, daß sich die wenigen Atomarten auf sehr verschiedene Weise zu Atomgruppen oder Molekülen zusammenfügen können, wie z. B. Wasser — daran wird sich fast jeder erinnern — aus Molekülen besteht, die je ein Sauerstoffatom und zwei Wasserstoffatome enthalten. Es war auch auf mehrere Arten gelungen, die Anzahl der Atome oder Moleküle zu bestimmen, die etwa in 1 ccm Eisen oder 1 ccm Wasser stecken, obgleich die Atome natürlich viel zu klein sind, um noch irgendwie direkt, etwa im Mikroskop, wahrgenommen werden zu können. Die wunderbar regelmäßigen Formen, die wir an den Kristallen bewundern, haben nun schon sehr früh die Vermutung nahegelegt, daß die einzelnen Atome oder Moleküle in ihnen ebenfalls schon ganz regelmäßig, also in gleichmäßigen Abständen, angeordnet sein müssen, und daß sie so also eine Art räumliches Netzwerk oder Gitter bilden, wie das in Abb. 10 angedeutet ist. Da wir nun aber die Anzahl der Moleküle z. B. in 1 ccm Steinsalzkristall oder in 1 ccm Kalkspat kennen, wissen wir auch sofort, wie groß der Abstand von einem Molekül bis zum nächsten ungefähr sein muß, er beträgt in beiden Fällen einige zehnmillionstel Millimeter, d. h. einige Å, das ist 100mal weniger als die Wellenlänge der kürzesten damals bekannten ultravioletten Strahlen. (Da wir von nun an hauptsächlich nur mit Abmessungen dieser Größe zu tun haben werden, soll im folgenden das Å = 1 hundertmillionstel Zentimeter als Längenmaß durchweg benutzt werden.) Hier setzt nun der Gedanke M. v. Laues ein: Wenn die Wellenlängen der Röntgenstrahlen wirklich viel kleiner sind als die der ultravioletten Strahlen, so ist es sehr wahrscheinlich, daß sie ungefähr dieselbe Größe haben wie der Abstand zweier benachbarter Moleküle in einem Kristall, und ich muß dann die in regelmäßigen Abständen befindlichen Kristallmoleküle oder Atome als ein Beugungsgitter für die Röntgenstrahlen benutzen können. Das nächste Bild (Abb. 11) zeigt uns das Ergebnis eines solchen Versuches, der nach der Theorie von Laue in Zusammenarbeit mit Friedrich und Knipping zum erstenmal ausgeführt wurde: Die Röntgenstrahlen fielen durch einen Kristall hindurch auf die photographische Platte und zeichneten dort die schön gleichmäßig angeordneten Punkte auf. Diese Art von Interferenzerscheinung ist gerade das, was man bei Verwendung eines räumliches Gitters zu er-

Abb. 10. Raumgitter
Aus Ewald, Kristalle und Röntgenstrahlen

warten hat; die Lauesche Vermutung war damit bestätigt, die Welleneigenschaft der Röntgenstrahlen gezeigt und die Möglichkeit der Bestimmung ihrer Wellenlängen aus dem Molekülabstand und der Richtung der durch Interferenz entstandenen Strahlen gegeben.

Abb. 11. Interferenzpunkte eines durchstrahlten Zinkblendekristalls
Aus Ewald, Kristalle und Röntgenstrahlen

Durch viele Versuche ist es in der Folgezeit möglich gewesen, mit Hilfe dieser Kristallinterferenzen gleichzeitig die Kristallstruktur zu erforschen und die Zusammensetzung der Röntgenstrahlen aus Strahlen verschiedener Wellenlänge zu ermitteln. Durch etwas andere Versuchsanordnung kann man nämlich erreichen, daß die von einem Kristall erzeugten Interferenzen der einzelnen Wellenlängen als Linien erscheinen und daß diese Linien nach der Größe der Wellenlänge angeordnet sind, alles genau wie bei den gewöhnlichen Spektren des sichtbaren Lichtes. Es ergab sich, daß auch ebenso wie bei diesen sowohl kontinuierliche Röntgenspektren (wie im sichtbaren das Sonnenspektrum) und aus einzelnen Linien bestehende Röntgenspektren (Abb. 12) (wie das sichtbare Spektrum der Quecksilberlampe) vorkommen und meist sogar gleichzeitig auftreten. Die gemessenen Wellenlängen der Röntgenlinien liegen zwischen 0,1 Å und etwa 200 Å, die kürzesten sind also etwa 500000mal so klein wie die Wellenlänge des sichtbaren (grünen) Lichtes. Die Eigenschaften der

Abb. 12. Röntgenspektrum des Wolframs
Aus Compton, X-Rays and Electrons

Röntgenstrahlen von verschiedener Wellenlänge unterscheiden sich sehr voneinander. Ihre Durchdringungsfähigkeit wird nämlich immer größer, je kleiner die Wellenlänge ist, gleichzeitig muß man eine immer größere elektrische Spannung an die Röntgenröhre legen, um sie zu erzeugen. Die größten Röntgenwellenlängen von etwa 180 Å sind, wie wir sehen, größer als die der oben angegebenen kurz-

welligsten ultravioletten Strahlen (130 Å = 0,013 μ). Die Gebiete der Röntgenstrahlen und der ultravioletten Strahlen greifen also ebenso übereinander wie die der elektrischen Wellen und der ultraroten Strahlen. Diese langwelligsten Röntgenstrahlen werden natürlich, da sie ja eben genau dasselbe sind wie die ultravioletten Strahlen derselben Wellenlänge, schon sehr stark in Luft absorbiert und können nur in hohem Vakuum beobachtet werden. Bei ihnen ist es aber wegen der Größe ihrer Wellenlänge noch möglich, mit einem gewöhnlichen Strich-Beugungsgitter zu arbeiten, und es ist daher gelungen durch Vergleich von Röntgenstrahlen verschiedener Wellenlänge auch die Wellenlänge kürzerer Strahlen noch direkt mit dem Beugungsgitter zu messen. Daraus ließ sich nun rückwärts der Abstand der Moleküle in den Kristallen berechnen und die sehr gute Übereinstimmung mit dem zuerst angenommenen Wert bildete noch eine sehr schöne Bestätigung unserer Vorstellungen vom Aufbau der Kristalle aus den Atomen und Molekülen. Die kurzwelligsten, oder, wie man sagt, härtesten Röntgenstrahlen, die man heute zu verwenden pflegt (dazu etwa 200000 Volt Spannung an der Röntgenröhre) werden erst von einer etwa 5 cm dicken Aluminiumplatte oder einem 1,5 mm dicken Bleiblech auf den zehnten Teil der anfänglichen Intensität herabgesetzt, doch könnte man bei Verwendung noch größerer Spannungen auch noch durchdringendere Röntgenstrahlen erzeugen. Blei schirmt von allen den billigeren Metallen die härteste Strahlung am besten ab, es wird daher auch viel verwendet, um die mit durchdringenden Strahlen arbeitenden Personen vor den schädlichen Einflüssen der Röntgenstrahlung zu schützen, denn die Röntgenverbrennungen sind sehr viel gefährlicher als die Verbrennung durch die ultravioletten Strahlen der natürlichen oder künstlichen Höhensonne.

Es hat sich gezeigt, daß man mit Hilfe von Röntgenstrahlen auch an freien Molekülen, wie sie z. B. in einem Gas vorkommen, noch Interferenzen erzeugen kann. Dadurch war es möglich, auf diesem direkten Wege über die „Architektur“ der Moleküle Aufschlüsse zu erhalten, welche eine schöne Bestätigung der von den Chemikern in der Stereochemie entwickelten Gedanken darstellen.

10. Gamma-Strahlen

Über die Eigenschaften der allerkurzwelligsten Röntgenstrahlen, die wir erhalten würden, wenn wir an unsere Röntgenröhre eine Spannung von ungefähr 2 Millionen Volt legen könnten (was bisher technisch kaum in Angriff genommen ist), wissen wir heute aber auf einem anderen Wege schon recht gut Bescheid: Die Natur liefert uns nämlich diese Strahlen selbst in Form der sogenannten γ-Strahlen (Gamma-Strahlen), die von den radioaktiven Substanzen ständig ausgesendet werden. Diese radioaktiven Stoffe sind außerordentlich selten, von dem wichtigsten von ihnen, dem Radium, existiert heute noch kaum 1 kg auf der ganzen Erde in chemisch konzentrierter Form. Die Strahlen der radioaktiven Stoffe gehören

nicht alle zu der bisher für uns interessanten Wellenstrahlung; wir werden uns daher mit ihrem Verhalten erst später genauer beschäftigen. Aber die γ-Strahlen sind elektromagnetische Wellen, sie schließen sich in ihren Wellenlängen unmittelbar an die Röntgenstrahlen an und unterscheiden sich von ihnen nur durch ihre noch größere Durchdringungsfähigkeit. Diese Durchdringungsfähigkeit ist bei den härtesten, d. h. kurzwelligsten uns bekannten Strahlen mit einer Wellenlänge von etwa 0,004 Å so groß, daß ihre Intensität erst von einem 5 cm dicken Bleiklotz merklich geschwächt wird. In den letzten Jahren ist es allerdings auf künstlichem Wege gelungen, radioaktive Substanzen zu erzeugen, bei denen γ-Strahlen von noch etwa 4mal kleinerer Wellenlänge auftreten, und auch die sogenannte kosmische Höhenstrahlung (siehe S. 63 und Kapitel V) enthält vielleicht eine noch viel kurzwelligere Strahlenart.

Wir sehen also, daß wir wahrscheinlich immer noch nicht an der letzten möglichen Grenze für die Kleinheit der Wellenlängen angelangt sind, und doch ist der von uns jetzt kurz durchstreifte Bereich der Wellenlängen von den langen elektrischen Wellen bis hinab zu den γ-Strahlen schon erstaunlich groß: die längsten in der drahtlosen Telegraphie verwendeten Wellen sind mehr als 10000 billionenmal so groß als die kürzesten Wellenlängen der γ-Strahlung des Radiums. Um so merkwürdiger kann es scheinen, daß unser Auge von allen diesen verschiedenen Strahlen nur diejenigen aus dem ganz kleinen und speziellen Wellenlängengebiet von 0,4 μ bis 0,8 μ, d. h. 4000 bis 8000 Å als Licht zu empfinden vermag und daß auch unsere anderen Sinne von allen Strahlen (abgesehen von der Wärmewirkung starker ultraroter Strahlen) nichts bemerken. Und doch hat diese Tatsache einen sehr einfachen Grund: Von den Strahlen, die uns die Sonne zusendet, liegen nämlich die intensivsten mit ihrer Wellenlänge gerade in der Mitte des sichtbaren Bereichs, im grünen, während die an sich schon schwächeren ultravioletten und ultraroten Sonnenstrahlen außerdem noch stark von der Atmosphäre absorbiert werden, Strahlen, deren Wellenlänge kürzer ist als 0,3 μ oder länger als 5 μ können die Lufthülle der Erde überhaupt nicht mehr durchdringen. Unser Auge sieht also von den Sonnenstrahlen, die durch die Atmosphäre durchkommen, den größten Teil, einen anderen ultraroten empfinden wir ebenso wie die ultrarote Strahlung erhitzter Körper noch als Wärme. Alle die übrigen Strahlen aber: die elektrischen Wellen, die kurzwelligen ultravioletten und die Röntgenstrahlen kamen in der Natur überhaupt nicht vor, ehe der Mensch sie zu erzeugen lernte, und es ist daher nicht zu verwundern, daß er sie mit seinen Sinnen nicht wahrzunehmen vermag.

II. Teilchenstrahlung

1. Strahlen aus materiellen Teilchen

Die elektromagnetischen Wellen, die wir im letzten Abschnitt kennengelernt haben, umfassen durchaus nicht alle Strahlenarten, die in der Natur vorkommen können. Wir brauchen nur an einen Wasserstrahl oder an einen aus einem Lokomotivventil entweichenden Dampfstrahl zu denken, um uns klar zu machen, daß ein Strahl nicht immer ein so geheimnisvolles Etwas zu sein braucht wie z. B. im Fall des Lichtes oder der Röntgenstrahlen, sondern daß auch ganz greifbare Teilchen, wenn sie nur schnell in gleicher Richtung dahinfliegen, einen Strahl bilden können. Nun scheint zwar ein Wasserstrahl dem Ideal eines Strahles sehr viel weniger zu entsprechen als ein Lichtstrahl, denn er wird bald durch die Anziehung der Erde herabgezogen und löst sich meist schon vorher in kleine Tröpfchen auf, und der Dampfstrahl ist noch weniger geeignet, um etwa eine gerade Linie zu definieren, weil der Dampf sich mit der Luft mischt und nach allen Seiten auseinandergewirbelt wird. Wir können aber doch fragen, ob es nicht möglich ist, eine Anordnung zu finden, bei der materielle Teilchen in einem scharfen, geraden Strahl dahin fliegen, und kommen dabei zunächst auf den Gedanken, den Dampf durch einen engen Kanal in einen luftleeren Raum zu pressen, weil dort der Dampfstrahl nicht mehr durch die Luft zerstreut werden kann. Wir hätten dann aber den Nachteil, daß sich der zunächst luftleere Raum sofort mit Dampf füllen würde, der sich nicht schnell genug wegpumpen läßt, und dieser Dampf würde den eintretenden Strahl genau so stören wie vorher die Luft. Man müßte also dafür sorgen, daß der Dampfstrahl sich nach Erreichung der gegenüberliegenden Wand sofort kondensiert und nicht wieder verdampft, und das läßt sich bei Wasserdampf im luftleeren Raum praktisch nicht erreichen. Wir können aber mit der folgenden Anordnung zum Ziel kommen:

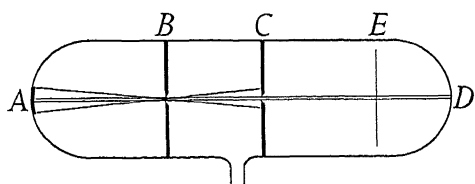



Abb. 13. Materiestrahlen im Vakuum

Wir bringen in einem Glasgefäß (Abb. 13) an das eine Ende bei A etwas Natriummetall und befestigen in der Mitte des Gefäßes zwei Blenden B und C mit je einer kleinen Öffnung. Pumpen wir nun das ganze Gefäß gut luftleer und erwärmen bei A so stark, daß das Natriummetall zu verdampfen anfängt (etwa bis 500°), so beobachten wir, daß sich bei D in der genauen Verlängerung der durch die beiden Öffnungen B und C hindurchgehenden Linie ein kleiner scharf begrenzter Fleck bildet, der aus dort niedergeschlagenem Natrium besteht. Wenn man bei E einen ganz feinen Draht quer durch die Linie hindurchzieht, so wird

der entstehende Niederschlag in zwei Hälften geteilt, der Draht wirft also, wie wir sagen können, einen scharfen Schatten (Abb. 14). Wir haben damit wirklich einen Strahl bekommen, der es mit den Lichtstrahlen aufnehmen kann, der aber irgendwie durch das Natrium gebildet werden muß, denn das Metall ist ja in diesem Strahl von A nach D gelangt. Wir können natürlich auch an Stelle von Natrium irgendein anderes Metall verwenden wie z. B. Silber, Kupfer oder Gold, nur müssen wir dann, weil diese Metalle erst bei höheren Temperaturen verdampfen, bei A einen Behälter aus Stahl oder Chamotte ansetzen, in dem das Metall sehr stark erhitzt werden kann.

Abb. 14. Metallniederschläge im Vakuum mit Schatten eines Drahtes
Aus Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften, Bd. III

Wie kommt aber nun der Strahl, in dem das Metall die ganze Länge unseres Gefäßes durchfliegt, überhaupt zustande? Um einen gewöhnlichen Metalldampfstrahl kann es sich jetzt sicher nicht mehr handeln, denn es ist ja in dem luftleer gepumpten Gefäß kein Überdruck vorhanden, der den Dampf durch die Blenden pressen könnte. Welche Kraft bewegt also das Metall jetzt vorwärts?

2. Wärmebewegung der Moleküle und Atome

Um diese Frage beantworten zu können, erinnern wir uns wieder an die Tatsache, die wir aus den Laueschen Interferenzen der Röntgenstrahlen in Kristallen kennengelernt haben, daß nämlich aller Stoff aus Molekülen und Atomen zusammengesetzt ist. Wir sahen dort, daß die Atome in einem Kristall ganz regelmäßig angeordnet sind; wir werden aber auch vermuten, daß diese Regelmäßigkeit in einer Flüssigkeit oder gar in einem Gase nicht mehr vorhanden sein kann. Die einzelnen Teilchen einer Flüssigkeit lassen sich sehr leicht gegeneinander verschieben, daher werden wir erwarten, daß sich auch die kleinsten Bestandteile, also die Moleküle in einer Flüssigkeit leicht aneinander vorbei bewegen können, aber doch noch sehr nahe beieinander sind, da sich ja eine Flüssigkeit nur schwer zusammendrücken läßt. Das Gas dagegen ist leicht zusammendrückbar und außerdem viel weniger dicht als die Flüssigkeit; hier müssen sich also die Moleküle in größeren Abständen voneinander befinden. Um nun den Umstand erklären zu können, daß sich ein Gas immer sofort über den ganzen Raum ausbreitet, der ihm zur Verfügung steht, daß es sich also ausdehnt und einen Druck auf die Gefäßwand ausübt, muß man annehmen, daß sich die Moleküle ständig in Bewegung befinden und immer so weit geradlinig fortfliegen, bis sie auf ein anderes Molekül oder die Wand des Gefäßes treffen. Der Druck, den jedes in einem Gefäß eingeschlossene Gas auf die Wand ausübt, erklärt sich also nach dieser Vorstellung durch die fortwähren-

den Stöße, mit denen die vielen Gasmoleküle auf die Wand aufprallen. Die bekannte Tatsache, daß der Druck einer bestimmten Gasmenge um so größer wird, je mehr ich sie erwärme, läßt uns weiter vermuten, daß die Geschwindigkeit und damit die Wucht der fliegenden Moleküle mit der Wärme zunimmt, daß also in einem warmen Gas die Moleküle schneller durcheinander fliegen als in einem kalten.

Die weitere Verfolgung dieser Ideen hat zu der allgemeinen Vorstellung geführt, daß die Eigenschaft der Wärme überhaupt nur durch die Bewegung der Moleküle hervorgerufen wird. In der Welt der Moleküle gibt es also die Begriffe „warm" und „kalt" nicht, ein einzelnes Molekül ist weder warm noch kalt; den aus den Molekülen aufgebauten Körper empfinden wir aber dann als warm, wenn sich seine Moleküle schnell bewegen und als kalt, wenn sie sich langsam bewegen. Diese Bewegung der Moleküle ist natürlich in den einzelnen Aggregatzuständen (fest, flüssig, gasförmig) noch verschieden voneinander: so werden z. B. in einem festen Körper die Moleküle ihre regelmäßigen Abstände und ihre feste Lage auch bei höheren Temperaturen beibehalten, sie schwingen nur etwas um ihre mittlere Lage herum und das um so schneller, je höher die Temperatur ist.

Wenn wir uns die Moleküle der Einfachheit halber als starre Kugeln vorstellen, so befinden sich diese Kugeln in einem festen Körper oder in einer Flüssigkeit so nahe beieinander, daß sie sich beinahe berühren, während sie in einem Gas größere Abstände voneinander haben. In gewöhnlicher Luft müßte man den Abstand der die Moleküle darstellenden Kugeln etwa 10mal so groß annehmen als den Durchmesser dieser Kugeln. Es ist nun zu verstehen, daß sich die Moleküle bei ihrer Durcheinanderbewegung recht oft gegenseitig stoßen werden, solange ihr durchschnittlicher Abstand noch so verhältnismäßig klein gegen ihren Durchmesser ist. Wenn ich die Luft mehr und mehr verdünne, so werden die Moleküle bis zum nächsten Zusammenstoß im Mittel immer längere Wege zurücklegen können, genau so wie ich in einem lichten Wald mit einem in beliebiger Richtung abgegebenen Schuß im Durchschnitt erst in sehr viel größerer Entfernung einen Baum treffen werde als in einem sehr dichten Wald. Man bezeichnet den Weg, den ein Molekül durchschnittlich durchfliegen kann, bis es auf ein anderes trifft, als die „mittlere freie Weglänge"; sie beträgt in Luft bei gewöhnlicher Temperatur und normalem Druck nur etwa $^1/_{10000}$ mm (0,1 μ), ist also kleiner als die Wellenlängen des sichtbaren Lichtes. So klein sind also die Strecken, die ein Luftmolekül auf einmal vorwärtskommt, bis es auf das nächste auftrifft und damit aus seiner Richtung abgelenkt wird.

Verdünnen wir nun aber die Luft in einem Glasgefäß so sehr, wie wir es heute mit unseren besten Saugpumpen erreichen können, so beträgt die mittlere freie Weglänge etwa 100 m! Das heißt: es ist ganz unwahrscheinlich, daß ein Luftmolekül im Innern des nur einige Zentimeter langen Glasgefäßes während seiner Wärmebewegung mit anderen Molekülen zusammenstößt, es fliegt immer so lange geradeaus, bis es auf die Wand aufprallt und wie eine Billardkugel zurückgewor-

fen wird. Trotzdem sind in einem Kubikzentimeter bei diesen höchsten Luftverdünnungen, die wir herstellen können, noch immer über 1 Milliarde Moleküle enthalten! Daß die Moleküle trotz dieser noch riesigen Zahl gar nicht mehr zusammenstoßen, liegt eben daran, daß ihr mittlerer Abstand nun sehr groß im Verhältnis zu ihrem Durchmesser ist, nämlich etwa 10000mal so groß, entsprechend einem „Wald", in dem man von einem Baum bis zum nächsten 1 km laufen müßte.

3. Die Atom- und Molekularstrahlen

Die große freie Weglänge der Moleküle in stark luftverdünnten Gefäßen liefert uns nun auch die Erklärung für das Zustandekommen unserer Natriummetallstrahlen. Wir verstehen nun, daß die bei A verdampften Metallatome infolge ihrer Wärmebewegung nach allen Richtungen davonfliegen, bis sie auf ein Hindernis stoßen. Alle diejenigen Atome, die sich dabei zufällig von A aus in Richtung auf die Löcher in B und C zu bewegen, fliegen durch diese Öffnungen hindurch und treffen die Glaswand bei D, wo sie aber nun nicht wie Luftmoleküle zurückgestoßen werden, sondern infolge des hohen Kondensations- und Schmelzpunktes der Metalle sich niederschlagen und einen fest haftenden Überzug bilden.

Wir haben damit das erste Beispiel für eine Art von Strahlen kennengelernt, die nicht von mit Lichtgeschwindigkeit bewegten elektromagnetischen Wellen gebildet werden, sondern aus einer großen Anzahl kleinster Teilchen oder Korpuskeln bestehen und daher als Teilchen- oder Korpuskularstrahlen bezeichnet werden. Und wir reden im speziellen hier, wo es sich um Atome oder Moleküle handelt, die ihre Geschwindigkeit einfach der allgemeinen Wärmebewegung der Materie verdanken, von Atomstrahlen oder Molekularstrahlen.

Wie groß sind nun die Geschwindigkeiten, mit denen die Atome in einem solchen Strahl dahinfliegen? Wenn die Vorstellung, die wir uns eben von der Entstehung der Atomstrahlen machten, richtig ist, sind es die gleichen Geschwindigkeiten, mit denen die Atome in dem Metalldampf bei der betreffenden Temperatur durcheinander wirbeln. Diese Geschwindigkeit läßt sich aber nach der Theorie der molekularen Wärmebewegung auf sehr einfache Weise aus der Temperatur und der Dichte des Gases oder Dampfes berechnen. So sollen sich z. B. die Luftmoleküle unter gewöhnlichen Umständen mit einer Geschwindigkeit von etwa 500m/Sek. bewegen, während man für die Geschwindigkeit der Atome in Silberdampf der Temperatur 2000° (Siedepunkt des Silbers) 600m/Sek. findet. Diese Geschwindigkeiten sind natürlich nur Mittelwerte, im einzelnen werden sich die Atome ziemlich verschieden schnell bewegen, aber man wird doch nur sehr wenige finden, deren Geschwindigkeit sehr viel größer oder sehr viel kleiner ist als die angegebenen Werte. Diese Werte sind nun recht groß, sie sind zwar außerordentlich klein gegen die Geschwindigkeit des Lichtes, aber doch größer als die Geschwindigkeit des Schalles, fast genau so groß wie die Geschwindigkeit eines Ge-

wehrgeschosses. Aber wir brauchen uns glücklicherweise nicht darauf zu verlassen, daß die Theorie richtig ist, wir können die Geschwindigkeit der Atome im Atomstrahl direkt messen.

Stellen wir uns nämlich vor, wir stünden in der Mitte eines Karussells und schössen, solange das Karussell ruht, auf eine am Rande befestigte Scheibe (Abb. 15). Wir treffen dann den genau in der Verlängerung des Gewehrlaufes liegenden Punkt A. Bewegt sich nun aber das Karussell und mit ihm das Gewehr und die Scheibe nach rechts herum, so hat sich in der kurzen Zeit, die das Geschoß bis zur Erreichung des Randes braucht, die Scheibe schon etwas weiterbewegt, und ich treffe daher den etwas links von A liegenden Punkt B. Entsprechend würde ich C treffen, wenn das Karussell sich nach der anderen Seite bewegt, und C und B liegen um so weiter von A entfernt, je schneller sich das Karussell dreht.

Abb. 15. Abweichung des Schusses auf der rotierenden Scheibe

Genau den gleichen Versuch kann ich mit den Atomstrahlen machen, indem ich das ganze Gefäß, in welchem die Strahlen entstehen, schnell einmal nach rechts, einmal nach links rotieren lasse und zwar so, daß die Blenden weiter innen an der Drehachse liegen als die den Strahl auffangende Wand. Ich erhalte dann wirklich zwei Flecke rechts und links von dem bei ruhenden Apparat entstandenen Fleck und kann aus dem Abstand der Flecke und der Umdrehungszahl des Gefäßes die Geschwindigkeit der Atome ausrechnen. Man findet auf diese Weise für die Atome des Silbers genau die gleiche Geschwindigkeit von 600 m/Sek. wie nach der Theorie und hat daher in den Atomstrahlen den unmittelbarsten Beweis dafür, daß die Wärme wirklich nichts anderes ist als Bewegung der Atome und Moleküle, und daß die Moleküle in der uns umgebenden Luft ständig mit Geschoßgeschwindigkeit durcheinanderfliegen.

Die Molekularstrahlen haben noch eine interessante Eigenschaft, durch die sie sich von allen Wellenstrahlen unterscheiden. Sie werden nämlich ein wenig aus ihrer Richtung abgelenkt, wenn ich sie sehr nahe am Pol eines starken Magneten vorübergehen lasse. Eine entsprechende Ablenkung kann auch auftreten, wenn eine sehr starke elektrische Kraft auf die dahinfliegenden Moleküle (Atome) wirkt, wenn diese also z. B. sehr nahe an einem elektrisch geladenen Draht vorbeilaufen müssen. Diese Ablenkungen sind bei den Molekularstrahlen immer sehr klein, sie verraten aber doch, daß in den Strahlen etwas enthalten ist, das sich elektrisch und magnetisch beeinflussen läßt. Beim Licht und allen anderen Wellenstrahlen ist eine solche Beeinflussung nicht möglich. Dagegen spielt die elektrische und magnetische Ablenkbarkeit eine sehr große Rolle bei einer anderen sehr wichtigen Art von Teilchenstrahlen, mit der wir uns nun beschäftigen müssen.

4. Die Kathodenstrahlen

Wir verwenden wieder wie bei den Atomstrahlversuchen ein längeres Glasrohr, das mit einer guten Vakuumpumpe verbunden ist, um die Luft im Rohr nach Belieben verdünnen zu können (Abb. 16). An den beiden Enden des Rohres ist aber jetzt je ein Platindraht durch das Glas geschmolzen, und an diesen Drähten sind innen dünne Aluminiumscheiben angebracht, während sie außen mit den Polen irgendeiner Gleichstromquelle verbunden werden, die eine Spannung von einigen tausend Volt zu liefern vermag (z. B. größere Influenzmaschine, Funkeninduktor). Je größer die Spannung der Stromquelle ist, desto größer ist auch die elektrische Aufladung der Aluminiumscheiben, der sogenannten Elektroden, denn die elektrische Spannung entspricht etwa dem, was wir bei einer Wasserleitung oder einer Gasleitung als den Druck bezeichnen. Da die Kraft, die von den Elektroden auf irgendein zwischen ihnen befindliches geladenes Teilchen ausgeübt wird, sich im gleichen Verhältnis mit der Spannung ändert, ist die Spannung ein direktes Maß für diese elektrische Kraft: ein positiv geladenes Teilchen wird also z. B. bei einer Spannung von 2000 Volt zwischen den Elektroden mit einer 10mal größeren Kraft nach der negativen Elektrode hingezogen als bei einer Spannung von 200 Volt.

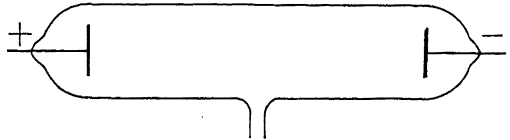



Abb. 16. Entladungsrohr

Solange nun unser Rohr mit Luft von Atmosphärendruck gefüllt ist, kann kein elektrischer Strom zwischen den Elektroden fließen, weil gewöhnliche Luft ein guter Isolator ist. Pumpen wir aber das Rohr mehr und mehr aus, so fängt bei einem Druck von etwa 20 mm Quecksilbersäule die Luft an leitend zu werden. (Bekanntlich entsprechen 760 mm Quecksilbersäule dem normalen Luftdruck von einer Atmosphäre.) Wir bemerken zunächst einen dünnen leuchtenden Faden, der etwa in der Achse des Rohres zwischen den Elektroden verläuft, und diese Lichterscheinung breitet sich bei weiterer Verdünnung der Luft über das ganze Rohr aus. Es fließt also jetzt ein elektrischer Strom durch unsere Röhre, d. h. es wird auf irgendeine Weise elektrische Ladung von einer Elektrode zur anderen befördert, und dieser Vorgang wird von dem Leuchten der im Rohr befindlichen verdünnten Luft begleitet. Die Leuchterscheinung verändert ihr Aussehen bei ständig fortschreitender Luftverdünnung immer weiter; so treten in der Nähe der negativen Elektrode, der sogenannten K a t h o d e, dunkle Räume auf, während sich auf der Seite der positiven Elektrode, der A n o d e, eine aus abwechselnd hellen und dunklen Schichten zusammengesetzte Erscheinung ausbildet. Endlich aber, bei einem Druck von etwa $^1/_{10}$ mm, hört das Leuchten der Luft fast ganz auf, dafür beginnt aber in immer stärkerem Maße die Glaswand unserer Röhre vor allem auf der

Seite der Anode ein grünliches oder bläuliches Licht auszusenden, das ähnlich aussieht wie das Fluoreszenzlicht, das von ultravioletten Strahlen oder Röntgenstrahlen in manchen Substanzen hervorgerufen wird.

Auch hier wird die Fluoreszenz des Glases durch unsichtbare Strahlen erzeugt, das erkennen wir deutlich aus der nächsten Figur (Abb. 17). Im Innern eines Entladungsrohres ist ein Metallkreuz angebracht, und dieses Kreuz wirft einen deutlichen „Schatten" auf die Glaswand des Gefäßes, genau als ob von der Kathode Lichtstrahlen ausgingen, die durch das Kreuz abgeschirmt werden. Der Schatten besteht ja aber hier nur aus denjenigen Stellen der Glaswand, an denen keine Fluoreszenz auftritt, die Fluoreszenz muß also von irgendwelchen Strahlen bewirkt werden, die geradlinig von der Kathode ausgehen und die man daher als Kathodenstrahlen bezeichnet. Die Geradlinigkeit der Kathodenstrahlen und die Tatsache, daß sie wirklich von der Kathode ausgehen, kann man auch gut erkennen, wenn man an die Stelle des Kreuzes eine Blende setzt, die nur eine feine Öffnung frei läßt; man bekommt dann in der genauen Verlängerung einer von der Kathodenmitte nach der Öffnung gezogenen Linie auf der Glaswand ein kleines, ziemlich scharf begrenztes Fluoreszenzbild der Öffnung. Bei einer größeren elektrischen Spannung zwischen den Elektroden unseres Rohres (etwa 50000 Volt) verschwindet dieses Bild auch dann nicht völlig, wenn wir eine dünne Aluminiumfolie (etwa 10 μ, Silberpapier) zwischen die Öffnung und die Glaswand bringen; die Kathodenstrahlen vermögen also dünne Materieschichten zu durchdringen. Wir können daher die Strahlen auch aus dem Gefäß in die Luft hinaustreten lassen, wenn wir an der Stelle, wo sie die Gefäßwand treffen, eine kleine Öffnung im Glas anbringen und die Öffnung mit einer dünnen Metallfolie wieder luftdicht verschließen. Auf diese Weise ist es möglich, mit Kathodenstrahlen auch außerhalb des Entladungsgefäßes zu experimentieren. Dieses ist ein Versuch, wie er zuerst von P. Lenard ausgeführt wurde, dem wir überhaupt viele Versuche verdanken, die für unsere Auffassungen über das Wesen der Kathodenstrahlen grundlegend gewesen sind.

Abb. 17. Schattenwirkung der Kathodenstrahlen
Aus Lecher, Lehrbuch der Physik

Die bisher erwähnten Eigenschaften der Kathodenstrahlen, dünne Metallschichten zu durchdringen und geeignete Substanzen zur Fluoreszenz anzuregen, erinnern uns sehr an die Röntgenstrahlen; wir könnten so zu der Vermutung kommen, daß es sich auch bei den Kathodenstrahlen um eine den Röntgenstrahlen verwandte elektromagnetische Strahlung handelt. Unsere nächsten Versuche zeigen uns aber bald, daß diese Vermutung falsch ist. Bringen wir nämlich in unserem Entladungsgefäß ein kleines leichtbewegliches Flügelrad an und lassen auf einer Seite Kathodenstrahlen auf seine Flügel fallen, so setzt sich das Rädchen bald in Bewegung, als ob es von materiellen Teilchen getroffen worden wäre. Während

aber diesem Versuch noch keine durchschlagende Beweiskraft zukommt, da auch Lichtstrahlen beim Auftreffen auf eine Fläche einen allerdings sehr kleinen, aber doch beobachtbaren Druck ausüben, unterscheiden sich die Kathodenstrahlen ganz besonders deutlich vom Licht und allen Wellenstrahlen durch ihre große magnetische und elektrische Ablenkbarkeit. Der leuchtende Fluoreszenzpunkt, den ein ausgeblendetes Kathodenstrahlbündel auf die Glaswand unserer Röhre zeichnet, verschiebt sich sofort, wenn wir einen Magneten nahe an das Gefäß heranbringen (Abb. 18). Den Einfluß einer elektrischen Kraft erkennen wir am deutlichsten, wenn wir in unserem Gefäß zwei Platten anbringen, die mit Hilfe von durch

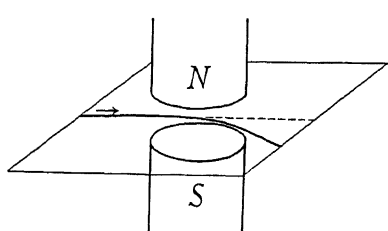



Abb. 18. Magnetische Ablenkung der Kathodenstrahlen

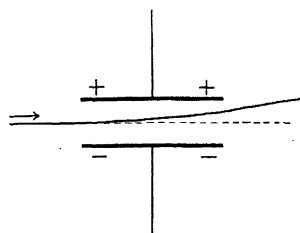



Abb. 19. Elektrische Ablenkung der Kathodenstrahlen

das Glas geschmolzenen Zuleitungen mit irgendeiner Gleichspannungsquelle verbunden sind. Ein Kathodenstrahl, der zwischen den elektrisch geladenen Platten hindurchläuft, wird aus seiner Richtung abgelenkt, was wir wieder an der Verschiebung des Fluoreszenzfleckes erkennen (Abb. 19).

Die ablenkende Wirkung einer elektrischen oder magnetischen Kraft bestimmter Größe auf die Kathodenstrahlen ist sehr viel größer als die Wirkung derselben Kräfte auf Atomstrahlen. Das bringt uns auf den Gedanken, daß es sich bei den Kathodenstrahlen um elektrisch geladene Teilchen handelt und zwar um negativ geladene Teilchen, weil die Ablenkung der Strahlen immer auf die positiv geladene Platte zu erfolgt und auch die magnetische Ablenkung nach der Richtung geht, die für negativ geladene Teilchen zu erwarten ist. Dieses Resultat stimmt auch gut mit der Tatsache überein, daß die Strahlen von der negativ geladenen Kathode ausgehen, also offenbar von ihr abgestoßen werden. Man kann aber die negative Ladung der Kathodenstrahlen am eindeutigsten nachweisen, indem man sie auf einer isolierten Platte auffängt, die mit einem Elektrometer verbunden ist, also einem Instrument, das jede elektrische Aufladung anzeigt und sich unter dem Einfluß der Kathodenstrahlen bald negativ auflädt.

Wenn aber die Kathodenstrahlen wirklich aus geladenen Teilchen bestehen, die sich unter der Einwirkung der im Entladungsgefäß vorhandenen elektrischen Kraft bewegen, so kann man mit der Methode der elektrischen und magnetischen Ablenkung noch mehr über sie erfahren. Es ist leicht zu verstehen, daß sich ein dahinfliegendes Teilchen um so schwerer aus seiner Richtung ablenken läßt, je schneller

es sich bewegt und je größer seine Masse, also seine Trägheit ist, daß aber umgekehrt eine größere Ladung des Teilchens zu einer größeren Ablenkung Anlaß geben muß. Man kann daher durch Beobachtung der Ablenkungen, die einmal von einer elektrischen, dann von einer magnetischen Kraft bekannter Größe an denselben Kathodenstrahlteilchen hervorgerufen werden, sowohl die Geschwindigkeit als auch das Verhältnis der Ladung zur Masse der Teilchen bestimmen. Einzeln lassen sich Ladung und Masse allerdings so leider nicht finden. Die Geschwindigkeiten der Teilchen, die man auf diese Weise ermittelt hat, ergeben sich außerordentlich groß, sie sind bei einer Spannung von 10000 Volt an unserem Rohr (zwischen Kathode und Anode) schon 60000 km/Sek., also $^1/_5$ der Lichtgeschwindigkeit (d. h. 100000mal größer als die Geschwindigkeiten der Atome in den Atomstrahlen) und werden bei größeren Spannungen noch größer, kommen allerdings auch bei den größten Spannungen zwar immer näher an die Lichtgeschwindigkeit heran, aber nie über sie hinaus. Für das Verhältnis von Ladung und Masse bekommt man bei allen Kathodenstrahlen unabhängig von der Art der Röhre und dem Material, aus dem die Kathode besteht, und bei nicht zu großen Spannungen auch unabhängig vom Wert dieser Spannung immer den gleichen Wert heraus. Wir vermuten daher, daß die Kathodenstrahlteilchen eine ganz bestimmte, immer gleiche Ladung und eine bestimmte Masse besitzen, daß sie überall vorkommen und in den Atomen und Molekülen eine wichtige Rolle beim Aufbau der Materie spielen.

5. Ionen und Elektronen

Es gibt noch einen anderen Vorgang, bei dem auch elektrisch geladene Teilchen auftreten, für die wir das Verhältnis ihrer Ladung zu ihrer Masse kennen: nämlich den als Elektrolyse bekannten Vorgang der elektrischen Zerlegung gewisser Lösungen. Ich hänge in die Lösung, die ich elektrolysieren will, z. B. irgendeine Metallsalzlösung wie Kupfersulfat, zwei Kupferstäbe als Elektroden und verbinde sie mit den Polen einer Gleichstromquelle. Wir beobachten dann, daß sich das Metall (also hier das Kupfer) an der einen Elektrode niederschlägt, während der andere Bestandteil des Salzmoleküls nach der anderen Elektrode wandert und das Kupfer des Kupferstabes in Lösung bringt. Man muß nun annehmen, daß die Moleküle in der Lösung von vornherein in zwei Teile gespalten waren, von denen die eine Hälfte, also z. B. hier die Kupferatome, eine positive, die andere (hier die Sulfatgruppe) eine negative Ladung tragen und daß sie wegen dieser Ladung von den Elektroden angezogen werden (Arrhenius 1887). Man bezeichnet solche geladene Atome oder Moleküle als Ionen und kann für sie leicht das Verhältnis von ihrer Ladung zu ihrer Masse angeben, weil man ja weiß, wieviel Strom man durch die Lösung schicken muß, um eine bestimmte Metallmenge niederzuschlagen. Man findet so, daß für Ionen das Verhältnis Ladung zu Masse immer sehr viel kleiner und zwar mindestens 2000mal kleiner ist als für die Kathoden-

strahlteilchen, sie müssen also entweder sehr viel kleinere Ladungen mit sich tragen oder sehr viel schwerer sein als die Strahlpartikel. Man hat durch weitere Versuche gefunden, daß das letztere der Fall ist, denn die Ladungen der Ionen sind entweder genau so groß oder sogar ein Vielfaches, also doppelt, dreifach usw. so groß als die Ladungen der Kathodenstrahlteilchen. Daher muß die Masse dieser Strahlenteilchen noch viel kleiner sein als die der Atome, die wir bisher als die kleinsten Teilchen betrachtet hatten, und zwar noch 1840mal kleiner als die Masse des leichtesten Atoms, des Wasserstoffatoms.

Alle Kathodenstrahlteilchen haben die gleiche Masse und die gleiche Ladung, ihre Ladung hat aber noch eine ganz besondere Bedeutung, sie ist nämlich die kleinste Ladung, die in der Natur überhaupt vorkommt. Millikan hat das durch einen sehr schönen Versuch beweisen können. Er spritzte ganz feinzerstäubte Öltröpfchen zwischen zwei horizontale Metallplatten, von denen die eine positiv, die andere negativ geladen war, und sorgte dafür, daß sich auch die Öltröpfchen elektrisch aufluden (meist geschieht das schon beim Zerstäuben des Öls). Er beobachtete nun die Tröpfchen durch ein Mikroskop und richtete die elektrische Kraft der Platten so ein, daß die Tröpfchen gerade zwischen den Platten schweben blieben, daß sich also ihr Gewicht und die elektrische Anziehung nach oben gerade aufhoben. Er konnte so die Ladung der Tröpfchen bestimmen und fand, daß es niemals vorkommt, daß ein Tröpfchen eine kleinere Ladung hat als ein Kathodenstrahlteilchen, es hat entweder die gleiche Ladung oder die doppelte, die dreifache usw.

Wir müssen die Kathodenstrahlpartikel also als Einheiten der Elektrizität betrachten, aus denen sich jede negative elektrische Ladung zusammensetzt; man hat ihnen, um das zum Ausdruck zu bringen, den Namen Elektronen gegeben. Da die Elektronen in einem Entladungsrohr immer auftreten, ganz gleichgültig aus welchen Materialien es besteht und welche Gase in ihm vor dem Auspumpen enthalten waren, müssen wir annehmen, daß die Elektronen irgendwie in allen Atomen enthalten sind. Und da wir weiter gesehen haben, daß die Ionen, also die geladenen Atome, genau die gleiche Ladung haben wie ein Elektron oder ein Vielfaches dieser Ladung, so können wir ein positives Ion als ein Atom betrachten, dem ein oder mehrere Elektronen entrissen worden sind, ein negatives als ein Atom, das sich mit einem oder mehreren Elektronen verbunden hat. Da die Masse der Elektronen sehr viel kleiner ist als die der Atome, wird sich dann ein Ion, ein geladenes Atom, in seiner Masse von einem ungeladenen doch nur sehr wenig unterscheiden.

Die Ladung eines einzelnen Elektrons ist etwa 100 Milliarden mal kleiner als die Ladungen, die man durch Reiben einer Glasstange oder einer Siegellackstange leicht erzeugen kann, sie ist aber doch im Verhältnis zur Kleinheit der Atome oder sogar der Elektronen als sehr groß zu bezeichnen. Wir sehen das am leichtesten aus folgender Überlegung. Wenn wir ein Gramm gewöhn-

liches Kochsalz in Wasser auflösen, so zerfällt es in gleichviel negativ geladene Chlorionen und positiv geladene Natriumionen. Jedes einzelne Jon hat die kleinste in der Natur existierende Ladung: die Ladung des Elektrons. Könnten wir nun alle aus dem einen Gramm Salz entstandenen positiven Jonen an den Nordpol der Erde und alle negativen an den Südpol bringen, so würde die Anziehungskraft trotz der ungeheuren Entfernung noch einem Gewichtszug von 16 kg entsprechen!

Wir müssen nun noch einmal zur Erzeugung der Elektronen in unserem Entladungsgefäß zurückkehren. Wir haben erwähnt, daß die Kathodenstrahlen sich erst ausbilden, wenn die Luft in der Röhre eine bestimmte Verdünnung erreicht hat, und wir werden nach dem, was wir über die Atomstrahlen erfahren haben, auch einsehen warum: die freie Weglänge muß so groß werden, daß die Elektronen ohne Zusammenstöße mit den Luftmolekülen an die Glaswand gelangen können. Verdünnen wir aber die Luft in der Röhre immer weiter, so können endlich wieder keine Elektronen mehr entstehen, weil dann zu wenig Luftmoleküle da sind, und diese sind nötig, um die Elektronen direkt abgeben zu können oder nach Abgabe eines Elektrons als positive Jonen auf die Kathode zu fliegen und dort weitere Elektronen durch ihren Aufprall loszuschlagen. Man kann aber auch in einem Rohr mit sehr hohem Vakuum noch Elektronen erhalten, wenn man die Kathode als Metallfaden ausbildet, den man durch einen elektrischen Strom zum Glühen bringt; dann werden nämlich infolge der größeren Wärmebewegung der Metallatome ständig Elektronen von dem erhitzten Draht ausgeschleudert.

Diese Art der Elektronenerzeugung mit Hilfe einer Glühkathode verwenden wir heute sehr viel in allen Elektronenröhren der Radiotechnik, in den Röntgenröhren und in den sogenannten Braunschen Röhren oder Kathodenstrahloszillographen. Unsere Rundfunkempfängerröhren sind nichts anderes als Glasröhren mit sehr hohem Vakuum. in denen Elektronen unter dem Einfluß einer hier nicht allzu großen Spannung (200 Volt) einen elektrischen Strom unterhalten. Die Röntgenstrahlen entstehen immer dann, wenn schnelle Kathodenstrahlteilchen, also Elektronen, die von einer großen elektrischen Spannung von vielen tausend Volt in Bewegung gesetzt werden, auf irgendeine Substanz (praktisch immer Metall) aufprallen, von denen dann die Röntgenstrahlung ausgeht. Ihre unmittelbarste Anwendung finden aber die Kathodenstrahlen neuerdings in den B r a u n s c h e n Röhren, die in den Fernsehempfängern eingebaut sind. In diesen Röhren wird ein intensiver Kathodenstrahl, der durch eine enge Öffnung ausgeblendet ist, an elektrisch geladenen Platten oder Magnetspulen vorbeigeführt; durch Veränderung der elektrischen oder magnetischen Kräfte kann man den Elektronenstrahl nach Belieben ablenken, so daß er jeden Punkt der mit einer besonders gut fluoreszierenden Substanz versehenen Endwand der Röhre erreichen kann. Während des Fernsehbetriebes läuft nun der Fluoreszenz-

punkt mit außerordentlich großer Geschwindigkeit über diesen Fluoreszenzschirm, bestreicht innerhalb einer zwanzigstel Sekunde jeden Punkt einmal und zeichnet so das Bild auf. Natürlich muß gleichzeitig noch die Intensität des Kathodenstrahls mit Hilfe einer besonderen Steuerelektrode ständig so verändert werden, daß das Bild in der richtigen Schattierung erscheint, sonst würden wir eine Fläche überall gleicher Helligkeit sehen. Das Fernsehbild ist also ein durch den Aufprall von Elektronen erzeugtes Fluoreszenzbild.

6. Die Kanalstrahlen

Nachdem wir in den Atomstrahlen eine Teilchenstrahlung kennengelernt haben, die aus ungeladenen Teilchen gebildet wird, und die Kathodenstrahlen als schnell bewegte negative Teilchen erkannt haben, vermuten wir, daß es auch Strahlen geben wird, die aus positiv geladenen Partikeln bestehen. Denn wenn wirklich alle Atome Elektronen enthalten, so müssen in unserem Entladungsrohr neben den Elektronen auch positive Gasionen auftreten, die dadurch entstehen, daß von den Atomen der Luft oder der sonst vorhandenen Gase Elektronen abgespalten werden. Wir können diese Jonen auch tatsächlich nachweisen, wenn wir unser Entladungsgefäß etwas anders ausbilden (Abb. 20). Wir setzen die Kathode K nicht mehr an das Ende unseres Gefäßes, sondern richten das Rohr so ein, daß es durch die Kathode in zwei Röhren geteilt wird, die durch schmale Löcher oder „Kanäle" in der Kathode miteinander verbunden sind. Entstehen nun etwa im ersten Teil des Rohres zwischen Anode und Kathode positive Jonen, so werden sie von der negativen Kathode angezogen, bewegen sich auf sie zu und fliegen zum Teil durch die Löcher der Kathode in den linken Raum hinüber. Man richtet es meist so ein, daß das Gas im linken Raum geringeren Druck hat, also stärker verdünnt ist als im rechten, so daß einesteils genügend positive Jonen gebildet werden können, andererseits die Jonen, die durch die Kanäle geflogen sind, nicht mehr auf Gasatome treffen, sondern eine große freie Weglänge haben. Man erhält so im linken Raum Strahlen, die aus positiv geladenen Teilchen bestehen, die man mit ihrem Entdecker Goldstein als Kanalstrahlen bezeichnet, weil sie von den Kanälen in der Kathode ausgehen. Wir können die Kanalstrahlen wieder durch die Fluoreszenz nachweisen, die sie in Glas und anderen Substanzen hervorrufen, wir können sie ebenso wie übrigens auch die Kathodenstrahlen auch photographieren, da sie die Platte gut schwärzen, wir können sie aber im Gegensatz zu den Kathodenstrahlen auch recht gut direkt im Entladungsrohr als leuchtende Strahlen sehen, weil die bei nicht allzu hohem Vakuum immer noch vorhandenen Gasreste und die Kanalstrahlionen selbst Licht aussenden. Leucht-

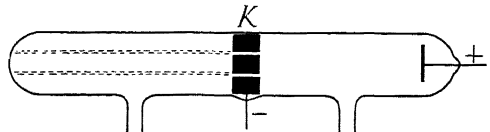



Abb. 20. Kanalstrahlenrohr

erscheinungen kommen überhaupt immer zustande, wenn sich die Jonen in einem verdünnten Gase unter dem Einfluß einer elektrischen Kraft bewegen: so entsteht das oben erwähnte Leuchten in einem Gasentladungsrohr bei höherem Druck, wenn noch keine Kathodenstrahlen auftreten, das in den Lichtreklameröhren seine technische Anwendung gefunden hat, und auch die Lichtaussendung der Quecksilberdampflampe beruht auf einem ähnlichen Vorgang. Wir werden das im nächsten Abschnitt noch besser verstehen lernen.

Uns ist es jetzt besonders wichtig, noch einen sicheren Aufschluß über das Wesen der Kanalstrahlteilchen zu erhalten; wir können zur Erreichung dieses Zieles wieder wie bei den Kathodenstrahlen die Methode der elektrischen und magnetischen Ablenkung verwenden. Die Durchführung solcher Versuche bestätigt zunächst unsere Vermutung, daß es sich um positiv geladene Teilchen handelt, die Kanalstrahlen werden von einer elektrischen oder magnetischen Kraft im umgekehrten Sinn abgelenkt wie die Elektronen. Weiter können wir aus den Ablenkungsversuchen wieder die Geschwindigkeit und das Verhältnis von Ladung zu Masse finden. Die Geschwindigkeit der Teilchen hängt natürlich auch hier von der Spannung an unserem Kanalstrahlrohr ab, da eine größere Spannung, also eine größere elektrische Kraft, die Teilchen mehr beschleunigt als eine kleine. Die Geschwindigkeit ist wieder recht groß, aber bei gleicher Spannung wesentlich kleiner als bei den Elektronen, für 10000 Volt beträgt sie einige 100 km/Sek., also etwa $^{1}/_{1000}$ der Lichtgeschwindigkeit. Das Verhältnis von Ladung zu Masse endlich ist für die einzelnen Kanalstrahlteilchen je nach dem verwendeten Gas sehr verschieden, aber immer sehr viel kleiner als bei den Elektronen, es ergeben sich nämlich die gleichen Werte, die man für die Jonen einer Lösung bei der Elektrolyse findet. Durch die Ablenkungsversuche wird also unsere Vermutung bestätigt, daß die Kanalstrahlen aus geladenen Atomen, aus Jonen bestehen, und die Verschiedenheit des Verhältnisses von Ladung zu Masse für die einzelnen Jonen ist dann leicht erklärlich, weil ja die Atomarten sehr verschiedene Massen, also verschiedene Atomgewichte besitzen und auch die Ladung nicht immer die positive Einheitsladung zu sein braucht. Jedenfalls tritt ein positiv geladenes Teilchen mit einer so kleinen Masse, wie sie das Elektron hat, hier nicht auf: das Elektron nimmt beim Aufbau der Atome offenbar eine Sonderstellung ein.

Eine direkte Methode zur Bestimmung der Geschwindigkeit der Kanalstrahlen wurde von Stark 1905 entdeckt, indem er nachwies, daß das von den Kanalstrahlteilchen kommende Licht je nach der Beobachtungsrichtung eine Wellenlängenänderung erfährt, die als Dopplereffekt bekannt ist. Ganz ähnlich hört man den Hupenton eines herannahenden Autos zu hoch, bis es am Beobachter vorbei ist, worauf sofort, weil das Auto sich vom Beobachter fortbewegt, der Ton tiefer wird.

7. Die radioaktive Strahlung

Das wichtigste Ergebnis unserer Beobachtung der Kathoden- und Kanalstrahlen ist die Erkenntnis, daß die Atome positive und negative elektrische Ladungen enthalten, daß also die Elektrizität eine grundlegende Rolle für den Bau des Stoffes auch dann spielt, wenn man diesem Stoff äußerlich irgendeine elektrische Eigenschaft gar nicht ansieht. Eine weitere Bestätigung findet diese Ansicht durch das Auftreten der sogenannten α-(Alpha-) und β-(Beta-)Strahlen der radioaktiven Substanzen. Im Jahre 1896 bemerkte zuerst Becquerel, daß von gewissen Verbindungen des Elementes Uran, dessen Atome das größte Gewicht aller bekannten Atome besitzen, eine Strahlung ausgeht, die eine photographische Platte durch schwarzes Papier hindurch beeinflußt. Außerdem wird die Luft in der Umgebung des Urans elektrisch leitend, wie man durch die Entladung eines aufgeladenen Elektroskopes feststellen kann. Die Wirkung geht, wie Pierre und Marie Curie feststellten, der Hauptsache nach aus von einem neuen bis dahin unbekannten chemischen Element, das von ihnen Radium genannt wurde. Seitdem ist noch eine ganze Menge anderer Elemente bekannt geworden, die ähnliche Wirkungen hervorbringen. Man bezeichnet diese als radioaktiv. Die weitere Untersuchung hat nun aber gezeigt, daß es sich bei dieser Wirkung durchaus nicht um eine einheitliche Strahlenart handelt, sondern daß von den radioaktiven Substanzen drei ihrem Wesen nach ganz verschiedene Strahlensorten ausgesendet werden. Wir können die Natur dieser Strahlenarten am besten aus der nächsten Figur (Abb. 21) erkennen, die den Einfluß einer starken magnetischen Kraft auf die vom Radium ausgehende Strahlung schematisch darstellt. Es tritt eine Strahlenart auf, die durch den Magneten schwach nach der einen Seite abgelenkt wird, wir nennen sie α-Strahlen; eine zweite erfährt eine wesentlich stärkere Ablenkung nach der entgegengesetzten Seite, das sind die β-Strahlen, die dritte endlich wird auch von sehr starken magnetischen Feldern nicht beeinflußt und als γ-Strahlung bezeichnet. Da die γ-Strahlen nicht abgelenkt werden, müssen sie entweder aus ungeladenen Teilchen bestehen oder sie sind eine Wellenstrahlung wie das Licht. Wir haben schon im ersten Abschnitt erfahren, daß die weitere Forschung für die Wellennatur der γ-Strahlen entschieden hat, wir haben sie dort als eine Röntgenstrahlung besonders kleiner Wellenlänge und besonders großer Durchdringungsfähigkeit kennengelernt. Die γ-Strahlen haben auch von den drei radioaktiven Strahlenarten die stärkste Durchdringungsfähigkeit.

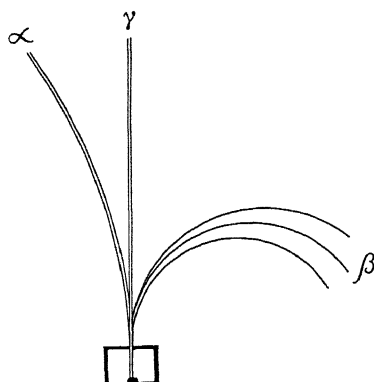



Abb. 21. Die drei radioaktiven Strahlungen

Bei den vom Magneten abgelenkten α- und β-Strahlen scheint es sich wieder um Strahlungen zu handeln, die aus geladenen Teilchen bestehen, und zwar müssen, wie sich aus der Richtung der Ablenkung ergibt, die wenig abgelenkten α-Strahlenteilchen positive, die stark abgelenkten β-Strahlteilchen negative Ladung besitzen. Wir können aber, wie wir das bei den Kathoden- und Kanalstrahlen getan haben, auch jetzt mehr über die Eigenschaften der Teilchen erfahren, wenn wir sie unter dem Einfluß elektrischer und magnetischer Kräfte von bekannter Größe ihre Bahn beschreiben lassen und die Endpunkte dieser Bahnen etwa photographisch festlegen, da sowohl die α- als die β-Strahlen photographisch wirksam sind.

8. Die Beta-Strahlen

Wir erhalten auf diesem Wege wieder das Verhältnis von Ladung zu Masse und die Geschwindigkeit unserer Teilchen und finden, daß diese Werte für die β-Strahlen sehr nahe mit denen übereinstimmen, die wir bei Kathodenstrahlen, also bei Elektronen, dann erhalten, wenn wir eine sehr große Spannung am Entladungsgefäß verwenden. Die Geschwindigkeiten der β-Strahlen ergeben sich nämlich als sehr groß, sie liegen zwischen etwa $^1/_3$ und 0,98 der Lichtgeschwindigkeit; die schnellsten β-Teilchen bewegen sich also nur um 2% langsamer als das Licht. Das Verhältnis von Ladung und Masse ist für β-Teilchen von z. B. $^1/_3$ Lichtgeschwindigkeit ganz das gleiche wie für Kathodenstrahlen derselben Geschwindigkeit, nimmt aber immer mehr ab, je mehr wir uns der Lichtgeschwindigkeit nähern. Diese Tatsache bedeutet offenbar, daß die Masse eines Teilchens um so größer wird, je schneller es fliegt. Dadurch wird es aber immer schwerer, das Teilchen weiter zu beschleunigen, und die Natur hat es gerade so eingerichtet, daß wir auch mit beliebig großen Kräften ein Teilchen niemals auf eine größere Geschwindigkeit bringen können als die des Lichtes. Das gilt nicht nur für die β-Strahlen. Die Lichtgeschwindigkeit ist nach allen unseren Erfahrungen die größte Geschwindigkeit, die es gibt: weder Wellen noch materielle Teilchen können sie überschreiten. Auch bei schnellen Kathodenstrahlen können wir die Zunahme ihrer Masse natürlich feststellen, denn es ergibt sich eindeutig, daß die β-Strahlteilchen und die Elektronen vollständig dasselbe sind: die β-Strahlen sind nichts anderes als sehr schnell bewegte Elektronen. Die große Geschwindigkeit und Energie der β-Teilchen kommt besonders gut in ihrem gegen normale Kathodenstrahlen sehr großen Durchdringungsvermögen zum Ausdruck: die β-Teilchen von 0,98 der Lichtgeschwindigkeit vermögen noch 5 mm dicke Aluminiumbleche zu durchschlagen.

9. Die Alpha-Strahlen

Die α-Strahlteilchen stehen zu den β-Teilchen in einem ähnlichen Verhältnis wie die Kanalstrahlionen zu den Kathodenstrahlen. Denn das Verhältnis von Ladung zu Masse ergibt sich für sie aus den Ablenkungsversuchen wieder sehr viel kleiner als für die β-Strahlen, wir haben es zweifellos mit geladenen Atomen, also mit Jonen zu tun. Es scheint sich aber um ein ganz bestimmtes, immer gleiches Jon zu handeln, da wir für alle α-Strahlen bei beliebigen radioaktiven Substanzen für das Verhältnis von Ladung zu Masse immer denselben Wert bekommen, und es ist nun eine sehr wichtige Frage, ob das α-Teilchen mit einem schon bekannten Atom identisch ist. Probiert man nun, welches Atom hier in Betracht kommen könnte, so findet man, daß bei einem doppelt positiv geladenen Heliumatom, also einem Heliumatom, dessen Ladung doppelt so groß ist wie die des Elektrons, aber positiv, das Verhältnis von Ladung zu Masse genau das gleiche ist wie beim α-Teilchen. Das α-Teilchen wäre also nach dem, was wir uns bisher über das Zustandekommen der Jonen vorgestellt haben, ein Heliumatom, dem zwei Elektronen fehlen. Wenn das aber richtig ist, so muß sich in der Nähe einer radioaktiven Substanz ständig Helium bilden, da sich die Jonen bald durch Verbindung mit überall vorhandenen einzelnen Elektronen in normale Heliumatome verwandeln müssen. Diese Bildung von Helium wurde nun tatsächlich mit Hilfe einer in ein Glasröhrchen eingeschmolzenen Radiumprobe festgestellt; in dem Röhrchen entstehen innerhalb einiger Zeit nachweisbare Mengen von Heliumgas. Wir haben damit die außerordentlich merkwürdige Entdeckung gemacht, daß von einer Atomart, dem Radium, ständig schnell bewegte geladene Atome einer anderen Substanz, dem Helium, ausgeschleudert werden.

Wenn wir alle Atomarten nach ihrem Gewicht, ihrer Masse ordnen, so kommt das Heliumatom an die zweite Stelle von unten, es ist nach dem Wasserstoffatom, das von allen Atomen das geringste Gewicht besitzt, das zweitleichteste und hat das Atomgewicht 4, d. h. es ist etwa 4mal so schwer wie das Wasserstoffatom. Wegen seines geringen Gewichtes ist ja auch das Heliumgas nach dem Wasserstoffgas am besten zur Füllung von Luftschiffen geeignet, wodurch es auch in weiten Kreisen bekannt geworden sein dürfte. Das Radium dagegen ist eines der schwersten Atome, 226mal schwerer als der Wasserstoff mit dem Atomgewicht 226. Wenn nun ein Radiumatom ein α-Teilchen, also ein Heliumatom vom Gewicht 4 ausschleudert, muß es um 4 Einheiten leichter werden, es bleibt dann aber kein Radiumatom mehr, denn das Atom vom Gewicht 222, das nun aus dem Radium entstanden ist, gehört einer gasförmigen Substanz an, die man als Emanation bezeichnet. Die Emanation ist selbst auch radioaktiv, sie sendet wieder α-Teilchen aus und verwandelt sich in eine dritte, ebenfalls radioaktive Substanz, und so geht es weiter, bis endlich einmal ein Atom entsteht, das nicht weiter zerfällt, in diesem Fall ein Bleiatom vom Gewicht 206. Die Geschwindig-

keit, mit der der Zerfall der einzelnen Atome aufeinanderfolgt, ist bei den einzelnen radioaktiven Substanzen außerordentlich verschieden. Beim Radium dauert es z. B. 1400 Jahre, bis von einer gewissen Menge Radium die Hälfte sich umgewandelt hat, beim Uran 4 Milliarden Jahre, und bei einer mit Radium C′ bezeichneten aktiven Substanz nur 1 millionstel Sekunde. Der Zerfall der einzelnen Atome unterliegt vollkommen den Gesetzen des Zufalls und läßt sich durch kein uns zur Verfügung stehendes Mittel (Temperatur, Druck, elektrische Einwirkung) beeinflussen. Wir wissen nur, daß ein Radiumatom durchschnittlich sehr viel schneller zerfällt als ein Uranatom und sehr viel langsamer als ein RaC′-Atom, ob aber ein bestimmtes Radiumatom schon heute durch Aussendung eines α-Teilchens sein Dasein beschließt oder erst in 2000 Jahren, läßt sich weder experimentell noch auch mit Hilfe der Theorie voraussagen.

Mit welcher Energie die α-Teilchen von den radioaktiven Atomen ausgeschleudert werden, können wir aus den Geschwindigkeiten der α-Teilchen beurteilen, die wir ja mit Hilfe unserer Ablenkungsmethode auch herausbekommen. Diese Geschwindigkeiten liegen zwischen $^1/_{20}$ und $^1/_{15}$ der Lichtgeschwindigkeit, sind also viel größer als die der Kanalstrahlteilchen. Wir bekommen am besten eine Vorstellung von der Energie, die diesen Geschwindigkeiten entspricht, wenn wir hören, daß wir eine Spannung von 4 Millionen Volt anwenden müßten, um die Heliumionen künstlich in einem Kanalstrahlrohr auf $^1/_{15}$ der Lichtgeschwindigkeit zu beschleunigen.

10. Nachweis einzelner α- und β-Teilchen

Auf der großen Energie der α-Teilchen beruht auch die Möglichkeit, sie nach der sogenannten Szintillationsmethode zu beobachten. Läßt man nämlich α-Teilchen in einem dunklen Raum auf einen Schirm fallen, der mit einer Zinksulfidschicht präpariert ist, so sieht man in unregelmäßiger Folge winzige Lichtfleckchen auf diesem Schirm erscheinen, von denen jedes durch ein einzelnes α-Teilchen hervorgerufen wird. Wir sehen also in diesem Fall eine Wirkung, die von einem einzigen Atom ausgeht. Auch die β-Teilchen sind übrigens imstande, in geeigneten Substanzen Szintillationen zu erzeugen.

Es gibt aber noch andere Methoden, die uns ebenfalls gestatten, einzelne α- oder β-Teilchen nachzuweisen, und um diese Methoden zu verstehen, müssen wir an den oben erwähnten Umstand anknüpfen, daß die radioaktiven Strahlen die Luft elektrisch leitfähig machen. Diese Leitfähigkeit wird zur Hauptsache von den α-Strahlen und zum Teil von den β-Strahlen erzeugt und kommt einfach dadurch zustande, daß die schnell dahinfliegenden geladenen Teilchen bei ihrem Vorübergang an den Luftmolekülen Elektronen von diesen losreißen und damit die Luftmoleküle in positiv geladene Jonen verwandeln. Bringen wir nun irgendeinen geladenen Gegenstand in die Nähe, so werden die Teilchen entgegen-

gesetzter Ladung, also entweder die losgeschlagenen Elektronen oder die positiven Jonen von ihm angezogen, und der Gegenstand wird entladen; wir finden also, daß die Luft leitfähig geworden ist.

Die durch die α- und β-Strahlen hervorgerufene Jonisation wird im sogenannten Geiger-Müllerschen Zählrohr zum Zählen der einzelnen α- oder β-Teilchen verwendet. Das Zählrohr ist im wesentlichen ein kleines Entladungsrohr, das mit irgendeinem Gas von geringem Druck gefüllt ist und an dessen Elektroden eine elektrische Spannung von der Größe gelegt wird, daß sie gerade noch keine Entladung im Rohr hervorrufen kann. Die von einem in das Rohr eintretenden α- oder β-Teilchen erzeugten Jonen genügen aber, um eine Entladung und damit einen kleinen elektrischen Strom zustande zu bringen, und dieser Strom kann dann so verstärkt werden, daß wir in einem Lautsprecher jedesmal einen Knack hören, wenn ein α- oder β-Teilchen ins Zählrohr gelangt.

Aber wir können die Jonisationswirkungen der α- und β-Teilchen sogar dazu benutzen, um ihre ganze Bahn vollständig sichtbar zu machen. Wir erinnern uns hier an die Tatsache, daß Luft von einer bestimmten Temperatur nur eine bestimmte Menge Wasserdampf aufnehmen kann, und zwar ist die Wasserdampfmenge, die etwa 1 cbm Luft im günstigsten Fall, im sogenannten Sättigungszustand, enthält, um so größer, je wärmer die Luft ist. Kühlen wir daher mit Wasserdampf gesättigte Luft plötzlich ab, so enthält sie nun zuviel Wasserdampf, sie ist übersättigt, und der Dampf muß sich, etwa in Form von Nebeltröpfchen, kondensieren. Solche Tröpfchen bilden sich in ganz reiner Luft aber sehr schwer, sie entstehen immer am schnellsten dort, wo irgendwelche Staubteilchen vorhanden sind, oder noch besser bei Anwesenheit von elektrischen Ladungen, also z. B. an den Luftionen, die durch α- oder β-Teilchen erzeugt werden.

Dieser Umstand gibt uns nun ein Mittel, um die Stellen, an denen sich Jonen befinden, sichtbar zu machen. Wir verwenden eine runde Dose, deren Boden als Kolben ausgebildet ist und sich zurückbewegen läßt, während der Deckel zum Beobachten durch eine Glasscheibe gebildet wird. Die Wände und der Boden werden mit feuchter Gelatine ausgekleidet, um die Luft immer im Zustand der Sättigung zu halten. Lassen wir nun etwa α-Teilchen in diese Dose, die sogenannte Wilsonsche Nebelkammer, einfallen, dann entsteht längs der Bahn jedes α-Teilchens eine große Anzahl von Jonen, und wenn wir nun den Kolben plötzlich zurückbewegen und damit die Luft der Kammer durch Ausdehnung abkühlen, so schlägt sich der übersättigte Dampf an diesen Jonen in Form von Nebeltröpfchen nieder und zeichnet so die Bahn als weißen Strich auf.

Die nächsten Figuren zeigen uns nach dieser Methode hergestellte Bilder der Bahnen von α- und β-Teilchen. Durch Vergleich der α-Aufnahme (Tf. 1, Abb. 22) mit der β-Aufnahme (Tf. 1, Abb. 23) erkennt man deutlich die stärkere Jonisation längs der Bahn der stärker geladenen und langsameren α-Teilchen im Gegensatz zu der mehr vereinzelten perlschnurartigen Jonisation längs einer β-Bahn. Man sieht

auch sofort, daß das schwere α-Teilchen viel gerader läuft und sich weniger aus seiner Bahn ablenken läßt als das viel leichtere Elektron.

Besonders auffallend ist an den α-Aufnahmen, daß alle Bahnen fast gleich lang sind, daß also die α-Teilchen, wie man sagt, eine bestimmte Reichweite haben. Das ist ein Beweis dafür, daß die α-Teilchen von den zerfallenden Atomen alle mit der gleichen Energie ausgeschleudert werden und daher die gleiche Geschwindigkeit haben, sie werden daher auch während der Ionisation der Luftmoleküle in ähnlicher Weise gebremst und verlieren endlich, wenn sie eine gewisse Energie eingebüßt haben, ihre Ladung durch Vereinigung mit Elektronen.

In einzelnen Fällen erleiden die α-Teilchen aber ein anderes Schicksal: es kommen nämlich Bahnen vor, die einen scharfen Knick aufweisen (Tf. 1, Abb. 24). Das α-Teilchen muß plötzlich durch eine außerordentlich große Kraft aus seiner Richtung abgelenkt worden sein, und diese Kraft kann, wie man leicht überlegt, nur von einem anderen geladenen Teilchen von ähnlich großer Masse wie die des α-Teilchens ausgehen, denn ein leichtes Teilchen wie ein Elektron würde von dem schweren α-Teilchen einfach weggeschleudert werden. Da die Kraft, mit der ein geladenes Teilchen auf ein anderes wirkt, um so größer wird, je näher sich die Teilchen kommen, und ein geladenes Teilchen nur dann sehr große Kräfte ausüben kann, wenn seine Ladung auf einen sehr kleinen Raum konzentriert ist, kann man aus der Größe der Ablenkung, die die α-Teilchen gelegentlich erfahren, und aus der Häufigkeit, mit der eine solche Ablenkung vorkommt, gewisse Schlüsse auf die Ausdehnung, also den Durchmesser der ablenkenden Teilchen ziehen. Für diesen Durchmesser findet man nun aber eine ganz erstaunlich kleine Zahl von $^1/_{10000}$ bis $^1/_{100000}$ Å, d. h. er müßte etwa 100000mal so klein sein wie der Durchmesser eines Atoms, von dem wir ja durch die Röntgeninterferenzen oder unsere Versuche über die freie Weglänge wissen, daß er etwa 1 Ångströmeinheit ausmacht. Da wir aber umgekehrt wissen, daß die Masse der ablenkenden Teilchen recht groß sein muß, bleibt doch wieder nichts übrig, als anzunehmen, daß es sich um die Atome handelt, die in der Luft vorkommen, also die Stickstoffatome und Sauerstoffatome, die ein Atomgewicht von 14 bzw. 16 besitzen und also $3^1/_2$ bzw. 4mal so schwer sind als das stoßende α-Teilchen. Zu dieser Annahme sind wir auch deshalb gezwungen, weil manchmal von der Knickstelle noch eine zweite kürzere Bahn ausgeht, die offenbar von dem getroffenen, ablenkenden Teilchen herrührt, das von dem α-Teilchen in Bewegung gesetzt worden ist. Die Richtung dieser neuen Bahn liegt dann mehr in der ursprünglichen Richtung des α-Teilchens, ganz wie es sein würde, wenn eine Billardkugel auf eine viermal so schwere ruhende Kugel gestoßen wird und diese in Bewegung setzt.

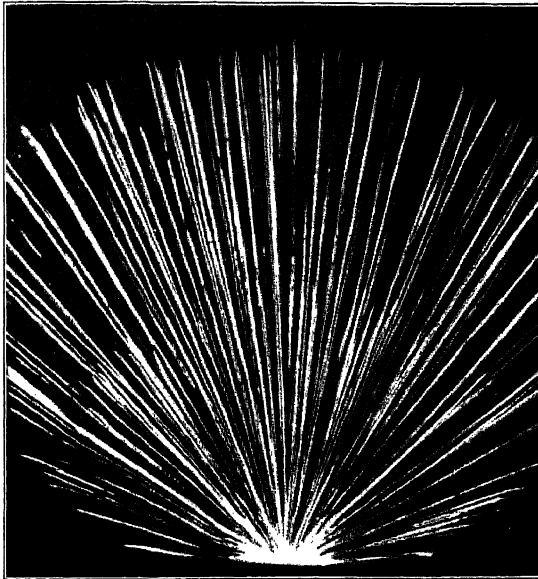



Abb. 22. Bahnen von α-Teilchen

Abb. 23. Bahnen von β-Teilchen

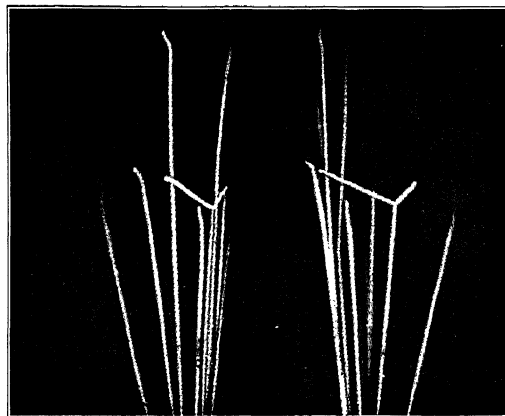



Abb. 24. Zusammenstoß eines α-Teilchens mit einem Sauerstoffatom

Abb. 22–24 entnommen aus Rutherford-Chadwick-Ellis, Radiations from Radioactive Substances

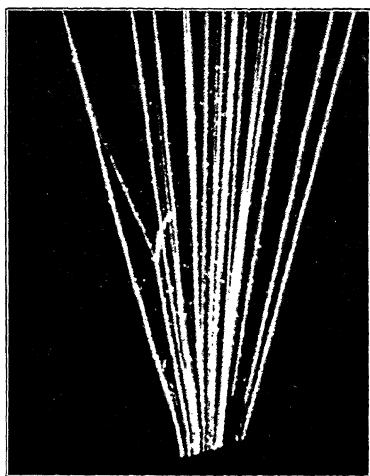



Abb. 31. Stickstoffzertrümmerung durch ein α-Teilchen

Aus Rutherford-Chadwick-Ellis, Radiations from Radioactive Substances

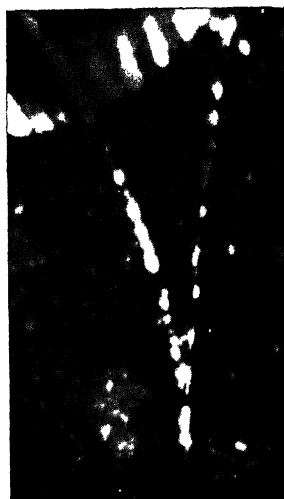



Abb. 34. Entstehung eines Elektrons und eines Positrons aus einem γ-Strahlquant (Curie-Joliot)

Abb. 32. Zertrümmerung von Lithium durch Protonen (Kirchner)

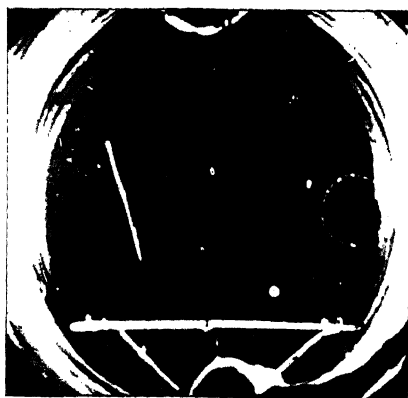



Abb. 33. Protonenstrahl in der Wilsonkammer durch ein Neutron ausgelöst (Curie-Joliot)

Abb. 32—34 entnommen aus Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften

11. Aufbau des Atoms aus Kern und Elektronenwolke

Die beiden sich widersprechenden Ergebnisse über die Größe des Atoms, zu denen die verschiedenen Versuche geführt haben, veranlaßten nun im Jahre 1912 E. Rutherford, sich eine neue Vorstellung vom Bau eines Atoms zu machen, durch die alle bisherigen Experimente ihre Erklärung fanden. Er nahm nämlich an, daß die ganze Masse eines Atoms in einem sehr kleinen positiv geladenen Teilchen, dem Atomkern, vereinigt ist, der gerade die Größe hat, die wir eben aus der Ablenkung der α-Teilchen gefunden haben. Um diesen Kern herum befinden sich in sehr viel größeren Abständen negative Teilchen, nämlich Elektronen, und zwar gerade so viel, daß ihre gesamte negative Ladung die positive Kernladung kompensiert und das Atom im ganzen ungeladen erscheint. Die Elektronen werden durch die Anziehung des Kerns zusammengehalten wie die Planeten unseres Sonnensystems von der Sonne, und das, was wir früher als den Durchmesser des Atoms gefunden haben, ist das Gebiet, bis zu dem sich die Elektronen bewegen können, ein Gebiet, dessen Größe sich zu der des Kerns verhält wie der größte Stratosphärenballon zu einem Stecknadelkopf. Ein gerade noch sichtbares Staubteilchen von $^1/_{10}$ mm Durchmesser würde in derselben Vergrößerung gerade so groß sein wie die ganze Erde. Wenn nicht allzu große Kräfte wirksam sind, können sich zwei Atome einander nur soweit nähern, bis sich ihre Elektronenhüllen berühren, da sich ja die Elektronen sehr stark gegenseitig abstoßen. Dadurch wird der normale Durchmesser des Atoms bedingt. Ein Teilchen von so großer Geschwindigkeit und Energie wie ein α-Teilchen dringt dagegen ohne weiteres zwischen den Elektronen hindurch (die ihrer Ausdehnung nach im einzelnen auch nicht größer sind als der Kern), und wird nur abgelenkt, wenn es dem Kern selbst sehr nahe kommt.

Aus der Ablenkung der α-Teilchen durch Kerne verschiedener Atome hat man auch die positiven Ladungen dieser Kerne ermitteln können und gefunden, daß ihre Ladung desto größer wird, je schwerer das Atom ist, und zwar ist bis auf Ausnahmen die Anzahl der positiven Elementarladungen gerade gleich der Nummer, die das Atom erhält, wenn man die Atome ihrem Gewicht nach ordnet. Das leichteste Atom, der Wasserstoff, hat also die Kernladung 1 und demnach auch nur 1 Elektron in seiner Hülle, das zweitschwerste, das Helium, die Kernladung 2 und zwei Hüllenelektronen und so weiter, endlich das schwerste, das Uran, die Kernladung 92 und 92 (äußere) Elektronen.

Wir sehen nun noch einen weiteren Grund dafür, daß ein α-Teilchen so leicht durch die Elektronenhüllen anderer Atome hindurchfliegen kann. Wir wissen ja, daß ein α-Teilchen dasselbe ist wie ein doppelt positiv geladenes Heliumatom, also ein Heliumatom, dem zwei Elektronen fehlen; da wir aber eben gesehen haben, daß ein Heliumatom überhaupt nur 2 Elektronen in seiner Hülle hat,

ist das α-Teilchen einfach der Kern des Heliumatoms und besitzt also selbst nur den kleinen Durchmesser eines Atomkerns.

Neben dem Heliumkern, dem α-Teilchen, fordert auch der Kern des Wasserstoffes unser besonderes Interesse; er ist ja der leichteste aller Kerne und hat deshalb den besonderen Namen: Proton (d. h. der Erste) erhalten. Die Protonen werden nicht wie die α-Teilchen von radioaktiven Substanzen ausgeschleudert, wir müssen also, um schnelle Protonenstrahlen zu erhalten, die Protonen mit Hilfe großer elektrischer Spannungen in einem Kanalstrahlrohr beschleunigen. Das wird heute tatsächlich viel getan, weil die Protonen und noch einige andere Teilchen, über die wir noch etwas erfahren werden, neben den α-Teilchen die wichtigsten Geschosse darstellen, mit deren Hilfe wir Eigenschaften des Atomkerns untersuchen können. Über diese Versuche und die Ergebnisse, zu denen sie geführt haben, wird im letzten Abschnitt noch ausführlich gesprochen werden.

III. Verschmelzung der Begriffe von Wellen- und Teilchenstrahlung

1. Der lichtelektrische Effekt

Wir haben uns in den beiden ersten Abschnitten mit zwei Arten von Strahlen beschäftigt, die wir bisher als ihrem Wesen nach gänzlich verschiedene Erscheinungen betrachten mußten. Die Teilchenstrahlen konnten wir stets als eine ungeordnete Folge von kleinen materiellen Bestandteilen auffassen; in ihnen bewegt sich jedes Teilchen ganz unabhängig von allen seinen Nachbarn. In den Wellenstrahlen fanden wir dagegen Kräfte elektrischer und magnetischer Natur wirksam, für die gerade die Tatsache charakteristisch ist, daß die Kraft an einer Stelle des Strahles von den Kräften abhängt, die in der Umgebung auftreten. Die wichtigste Folge dieser Abhängigkeit ist das Entstehen der nur bei Wellenstrahlen zu erwartenden Interferenzerscheinungen. Alle etwa bis zum Jahre 1900 gefundenen Eigenschaften der Wellen- und Teilchenstrahlen ließen sich auch stets unter der Annahme der grundsätzlichen Verschiedenheit der beiden Strahlenarten verstehen. Seit diesem Zeitpunkt wurden aber neue Erscheinungen bekannt, die immer mehr dazu zwangen, den strengen Unterschied zwischen Wellen und Teilchen fallen zu lassen, und es ist daher zunächst nötig, daß wir die wichtigsten dieser Erscheinungen kennenlernen, die das Bild, das wir uns von der Natur der Strahlen machen müssen, so überraschend geändert haben.

Der Vorgang, der uns hier zunächst beschäftigen soll, ist die Erzeugung oder Beeinflussung eines elektrischen Stroms durch Lichtstrahlen in der sogenannten lichtelektrischen oder photoelektrischen Zelle. Eine solche Zelle ist wieder nichts anderes als ein luftleer gepumptes Glasgefäß mit zwei durch das Glas

geschmolzenen elektrischen Zuführungen, nur ist die eine Elektrode diesmal als eine auf die Innenwand des Gefäßes niedergeschlagene Metallschicht ausgebildet (Abb. 25). Verbinden wir nun die beiden Zuführungsdrähte außen mit einem Strommeßinstrument, so kann dieses natürlich keinen Strom anzeigen, weil ja gar keine Spannungsquelle im Stromkreis enthalten ist. Doch finden wir, daß immer dann, wenn wir einen helleren Lichtstrahl auf die meist aus Natrium, Kalium oder Cäsium bestehende Metallschicht in der Zelle fallen lassen, ein allerdings sehr schwacher Strom durch unser Instrument fließt, und zwar immer in dem Sinne, daß die Metallschicht zum negativen Pol, zur Kathode unserer Zelle wird. Der Strom kann durch Einschalten einer Batterie verstärkt werden und ändert sich in seiner Größe im gleichen Maße wie die Intensität des auf die Kathode gestrahlten Lichtes. Die Photozelle wird daher heute überall verwendet, wo man irgendwelche Helligkeiten genau messen will, und wird auch sonst sehr viel gebraucht, um Licht in elektrische Ströme umzusetzen. Eine Verwandlung von Lichtenergie in einen sich entsprechend ändernden elektrischen Strom ist z. B. in jedem Fernsehsender nötig, und auch bei der Tonfilmwiedergabe muß die Photozelle die Lichtschwankungen eines durch den Film laufenden Strahls erst in Stromschwankungen umsetzen, die dann in einem gewöhnlichen Lautsprecher in Schallenergie übergeführt werden.

Abb. 25. Auslösung von Elektronen durch Licht

Wie kommt nun aber der Strom in unserer Zelle unter dem Einfluß des Lichtes überhaupt zustande? Genauere Versuche zeigen uns, daß das Licht die Eigenschaft hat, Elektronen mit einer gewissen Geschwindigkeit aus der bestrahlten Metallschicht herauszuschleudern. Die Elektronen gelangen zum Teil zur Anode, übertragen an diese ihre Ladung und erzeugen so den lichtelektrischen Strom. Die Geschwindigkeit der Elektronen können wir leicht feststellen, wenn wir die Kathode, also die Metallschicht, von der die Elektronen ausgehen, mit Hilfe einer meßbaren Spannung positiv aufladen. Die Elektronen werden dann von der Kathode zurückgezogen wie ein in die Höhe geworfener Stein von der Anziehungskraft der Erde wieder heruntergezogen wird. Wir machen die positive Ladung so groß, daß gerade keine Elektronen mehr zur Anode kommen können, daß also gerade kein Strom mehr fließt. Je schneller die Elektronen fliegen, desto größer ist die dazu nötige Spannung, aus der wir die Geschwindigkeit dann leicht berechnen können.

Bestrahlen wir nun eine Photozelle nacheinander mit Licht von verschiedenen Farben, also verschiedenen Wellenlängen, und stellen jedesmal fest, welche Ge-

schwindigkeit die von der betreffenden Lichtart ausgelösten Elektronen haben, so finden wir eine eigentümliche Gesetzmäßigkeit. Es zeigt sich nämlich, daß die Geschwindigkeit der lichtelektrischen Elektronen um so größer wird, je kürzer die Wellenlänge des eingestrahlten Lichtes ist, je mehr also die Farbe des Lichtes nach dem Violetten und Ultravioletten geht. Mache ich umgekehrt die Wellenlänge größer, so werden die Elektronen immer langsamer, und von einer gewissen Farbe an kommen überhaupt keine Elektronen mehr aus der Metallschicht heraus, ich erhalte also z. B. auch bei sehr starkem roten Licht keinen Strom mehr in meiner Zelle. Die Wellenlänge, bei der dies eintritt, ist für die einzelnen Metalle, aus denen die Kathodenschicht bestehen kann, recht verschieden; es gibt Metalle, die überhaupt erst bei ultraviolettem Licht Elektronen aussenden, andere sind auch für rotes Licht noch lichtelektrisch empfindlich. Immer finde ich aber eine Zunahme der Geschwindigkeit der Elektronen mit abnehmender Wellenlänge des Lichtes. Besonders eigenartig ist es, daß diese Geschwindigkeit von der Intensität des Lichtes überhaupt nicht abhängt, bei ganz schwachem violetten Licht z. B. fliegen die Elektronen ganz genau so schnell wie bei sehr hellem, nur die Zahl der ausgelösten Elektronen ist bei dem hellen Licht sehr viel größer.

2. Licht als Teilchenstrahlung, Lichtquanten

Die Unabhängigkeit der Geschwindigkeit von der Intensität des Lichtes ist nicht zu verstehen, wenn wir das Licht als eine Wellenerscheinung betrachten, wie wir das bisher immer getan haben. Denn in sehr schwachem Licht muß auch die elektrische und magnetische Kraft sehr viel schwächer sein als in starkem, und die Elektronen müßten daher mit sehr viel kleinerer Geschwindigkeit ausgesendet werden. Bestände das Licht dagegen genau wie etwa die Kathodenstrahlen aus einzelnen Teilchen, so brauchten wir nur anzunehmen, daß die Teilchen, die im blauen Licht auftreten, eine größere Energie haben als die Teilchen des roten Lichtes, um alle Erscheinungen des lichtelektrischen Effektes erklären zu können. Denn schwaches violettes Licht setzt sich dann eben aus wenigen Lichtteilchen großer Energie zusammen, und diese können wenige Elektronen großer Geschwindigkeit erzeugen, wie es tatsächlich beobachtet wurde.

Schon im Jahre 1900 hatte M. Planck gefunden, daß man die eigenartige Verteilung der von einem erhitzten Körper ausgestrahlten Energie über die verschiedenen Wellenlängen nur verstehen kann, wenn man annimmt, daß die Lichtenergie nur in bestimmten Einzelquanten ausgesendet werden kann, deren Größe von der Wellenlänge abhängt. Auch dort hatte sich ergeben, daß die Energie dieser Einheiten, die Planck als Quanten bezeichnete, um so größer ist, je kleiner die Wellenlänge des Lichtes ist, oder, was auf das gleiche herauskommt, je größer seine Frequenz ist. Wir haben uns ja schon im ersten Abschnitt überlegt, daß bei einem Wellenvorgang die Frequenz, d. h. die Anzahl der Schwingungen in

einer Sekunde, eng mit der Wellenlänge zusammenhängt, da ich ja z. B. 100mal kürzere Wellen auf einer Wasserfläche bekomme, wenn ich sie 100mal öfter in einer gewissen Zeit anstoße, und die Ausbreitung der Wellen in beiden Fällen gleich schnell erfolgt. Die Energie eines Quants wächst also mit seiner Frequenz; ja, ich kann die Energie ganz allgemein finden, wenn ich einfach die Frequenz mit einer bestimmten Zahl, dem sogenannten Wirkungsquantum, multipliziere, das Planck mit dem Buchstaben h bezeichnete, und das er aus dem Gesetz der Wärmestrahlung ausrechnen konnte. Der universell gültige Zahlenwert dieses Wirkungsquantums ist heute sehr genau bekannt. Beispielsweise besteht grünes Licht aus Energiequanten, deren jedes einzelne fähig ist, einem Elektron eine Geschwindigkeit zu erteilen, wie man sie auch durch Beschleunigung mit einem Potential von einigen Volt erreichen kann. Dagegen bestehen Röntgenstrahlen aus Energiequanten, welche in derselben Art mehreren tausend Volt entsprechen.

A. Einstein betonte nun zuerst im Jahre 1905, daß, wie wir uns schon überlegten, auch die lichtelektrischen Erscheinungen zu der Vermutung Anlaß geben, daß das Licht aus Teilchen, aus sogenannten Lichtquanten besteht, deren Energie von der Frequenz abhängt. Durch weitere Versuche konnte vor allem gezeigt werden, daß die aus der Geschwindigkeit der lichtelektrischen Elektronen folgende Energie dieser Lichtquanten genau die gleiche ist wie die von Planck berechnete, daß sich also die Größe h aus den lichtelektrischen Versuchen genau so groß ergibt wie aus dem Gesetz der Wärmestrahlung. Aber die Wärmestrahlung und der Photoeffekt blieben nicht die einzigen Anwendungsmöglichkeiten für die Vorstellung von den Lichtquanten; es wurden noch eine große Anzahl von weiteren Erscheinungen aufgefunden, die sich nur durch Annahme der Lichtteilchen erklären ließen und die immer wieder denselben Wert für das wichtige Plancksche Wirkungsquantum h ergaben.

3. Zusammenstoß von Lichtquanten und Elektronen (Compton-Effekt)

Besonders auffallend werden die Quanteneigenschaften der Wellenstrahlung bei den Röntgenstrahlen und den γ-Strahlen, weil der hohen Frequenz dieser Strahlenarten eine sehr hohe Energie der Lichtquanten entspricht. Compton fand 1922, daß beim Auftreffen von Röntgenstrahlen bestimmter Wellenlänge auf Substanzen mit geringem Atomgewicht eine seitlich gestreute Röntgenstrahlung mit etwas größerer Wellenlänge auftritt. Die Zerstreuung von Licht oder Röntgenstrahlen an den Molekülen und Atomen eines Gases, einer Flüssigkeit oder eines für die betreffenden Strahlen durchlässigen festen Körpers ist an sich ein immer auftretender Vorgang, aber bei der gewöhnlichen Streuung ist stets die Wellenlänge der seitlich gestreuten Strahlung genau so groß wie die Wellenlänge des eingestrahlten Lichtes. Im Gebiete des sichtbaren Lichtes besteht noch

die besondere Eigentümlichkeit, daß hier das Licht um so mehr gestreut wird, je kleiner seine Wellenlänge ist. Auf dieser Tatsache beruht die blaue Farbe des Himmels, denn das Himmelslicht ist ja nichts anderes als von den Luftmolekülen zerstreutes Sonnenlicht. Bei den Röntgenstrahlen finden wir nun neben dem ohne Änderung seiner Wellenlänge gestreuten Licht auch Streulicht mit größerer Wellenlänge (oder kleinerer Frequenz), und zwar ist die Wellenlängenänderung für die rückwärts gestreuten Strahlen größer als für die mehr nach vorn gestreuten. Dieser Effekt ist, wie Compton und Debye zeigten, eine Folge der Quantennatur der Röntgenstrahlen. Wir können uns vorstellen, daß ein Röntgenstrahlenquant genau so wie ein materielles Teilchen einen gewissen Impuls besitzt und daß es daher ein Elektron, auf welches es auftrifft, fortzustoßen vermag. Bei diesem Stoß wird das Röntgenstrahlquant ähnlich wie die auf die Kerne treffenden α-Teilchen seitlich abgelenkt und gibt einen Teil seines Impulses und seiner Energie an das getroffene Elektron ab. Das gestreute Strahlquant hat aber nun wegen seiner geringeren Energie auch eine geringere Frequenz; d. h. die gestreute Strahlung hat eine größere Wellenlänge als die auffallende, und der Wellenlängenunterschied zwischen beiden wird um so größer, je mehr das Lichtquant nach rückwärts abgelenkt wird, weil es dann mehr Energie an das Elektron übertragen hat.

Wir haben sowohl beim Photoeffekt wie auch beim Compton-Effekt gefunden, daß das Licht die Fähigkeit hat, Elektronen in Bewegung zu versetzen. Das Licht, die Röntgenstrahlen und die γ-Strahlen erzeugen daher, wenn auch in viel geringerem Maße als die β- oder gar die α-Teilchen, eine gewisse Ionisation, die man z. B. dazu verwenden kann, um Licht oder Röntgenstrahlen mit dem Geiger-Müllerschen Zählrohr nachzuweisen. Das Zählrohr zählt in diesem Fall nicht geladene Teilchen, sondern Lichtquanten, so daß wir auch hier wieder den unmittelbaren Eindruck von der Teilchennatur des Lichtes bekommen.

4. Elektronen als Wellen (Materiewellen)

Diese neuen Entdeckungen versetzen uns in eine unangenehme Lage. Als was sollen wir uns das Licht und die anderen elektromagnetischen Strahlen nun eigentlich vorstellen? Wir können an der Wellennatur des Lichtes nicht zweifeln, da ja Interferenzen nur bei einer Wellenbewegung entstehen können; wir müssen aber gleichzeitig auch an die Existenz der Lichtquanten glauben, weil sonst der lichtelektrische Effekt und ähnliche Erscheinungen nicht zu begreifen sind. Wir könnten uns aber vielleicht mit dem Gedanken trösten, daß das Licht eben ein ganz besonders komplizierte Erscheinung ist, und sein Wesen besonders schwer zu ergründen ist, da schon zu der Zeit, als Huygens die Wellentheorie des Lichtes aufstellte, ein anderer großer Physiker, J. Newton, für die Vorstellung von der Teilchennatur des Lichtes eintrat. Was sollen wir dann aber sagen, wenn wir

hören, daß auch bei den Teilchenstrahlen, die unserem Verständnis als materielle Dinge viel näher zu stehen scheinen, ganz ähnliche Schwierigkeiten auftreten? Im Jahre 1924 kam L. de Broglie auf die Vermutung, daß ebenso wie das Licht neben seinen Welleneigenschaften auch Teilcheneigenschaften besitzt, auch die Kathodenstrahlen und die anderen im zweiten Abschnitt behandelten Strahlenarten außer ihrer korpuskularen Natur sich vielleicht manchmal wie Wellen verhalten könnten. Er konnte auch durch theoretische Überlegungen voraussagen, daß die Wellenlänge dieser Wellenart um so kleiner sein müsse, je größer die Geschwindigkeit der Teilchen ist, und daß zu Elektronen, die in einem Entladungsgefäß mit einer Spannung von einigen 100 Volt beschleunigt werden, eine Wellenlänge von etwa 1 Å gehören sollte, d. h. eine Wellenlänge, die wieder genau so groß ist wie die Wellenlänge der Röntgenstrahlen oder die Abstände der Atome in einem Kristall.

Wenn also der Gedanke de Broglies richtig war, so mußte man auch mit Kathodenstrahlen ebenso wie mit Röntgenstrahlen Interferenzerscheinungen bekommen können, wenn man sie durch einen Kristall oder einen anderen festen Körper, in dem die Atome gitterförmig angeordnet sind, hindurchstrahlt. Da nun ein jedes Metall aus kleinen Metallkristallen mit regelmäßig geordneten Atomen zusammengesetzt ist, braucht man die Kathodenstrahlen nur durch eine dünne Metallfolie, z. B. eine Goldfolie, fallen zu lassen und die hindurchgegangene Strahlung zu photographieren. Wir sehen im nächsten Bild das Resultat eines solchen Versuchs (Abb. 26). Es entsteht wirklich eine schön ausgebildete, aus einzelnen Ringen bestehende Interferenzerscheinung; die durch Streuung an den einzelnen Atomen gebildeten Elektronenwellen haben sich in bestimmten Richtungen verstärkt, in anderen ausgelöscht. Mit Röntgenstrahlen lassen sich im Prinzip ganz die gleichen ringförmigen Interferenzbilder erhalten (Abb. 27), nur haben die Ringe im allgemeinen einen größeren Durchmesser, weil man bei Röntgenstrahlen nicht mit so kleinen Wellenlängen arbeiten kann wie bei schnelleren Kathodenstrahlen. Die Wellenlänge der Kathodenstrahlen, die wir ja aus dem bekannten Atomabstand in Gold berechnen können, stimmt genau mit der Voraussage de Broglies überein; es gilt nämlich die sehr einfache Beziehung, daß sich durch Multiplikation der Wellenlänge mit der Masse und der Geschwindigkeit der Kathodenstrahlteilchen immer die uns schon bekannte Planck-

Abb. 26. Elektroneninterferenzen an einer Goldfolie
Aus Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften, Bd. IX

sche Zahl h ergibt, die also auch für diese Erscheinung eine wesentliche Rolle spielt.

Die Interferenzen der Kathodenstrahlen sind durch eine große Anzahl der verschiedensten Versuche immer wieder bestätigt worden, so daß wir an der Existenz der Elektronenwellen, die man zur Unterscheidung von den elektromagnetischen Wellen als Materiewellen bezeichnet, ebenso wenig zweifeln können wie an der Existenz von Lichtquanten. Da ja aller Stoff, alle Materie letzten Endes aus Elektronen und den Atomkernen zusammengesetzt ist, und wir für die Kerne Welleneigenschaften ebenso annehmen müssen wie für die Elektronen (sie lassen sich bei den schweren Teilchen sehr schwer messen, weil die Wellenlänge hier außerordentlich klein wird), sind wir also jetzt in bezug auf die Materie in einer ähnlichen Lage wie vorhin schon beim Licht; wir müssen, obgleich wir einesteils von dem konkreten Aufbau des Stoffes aus einzelnen Teilchen überzeugt sind, doch zur Erklärung mancher Erscheinungen auch an eine Wellennatur der Materie glauben.

Abb. 27. Röntgeninterferenzen an einer Aluminiumfolie
Aus Bragg, The Crystalline State

Zunächst scheint also durch die neuen Erkenntnisse alles viel unverständlicher und unklarer geworden zu sein. Wir konnten in den ersten Abschnitten jede Strahlenart eindeutig entweder den Wellen oder den Korpuskularstrahlen zuordnen, sehen aber jetzt, daß wir alle Strahlenarten zum Teil als Wellen und zum Teil als aus Teilchen bestehend auffassen müssen, obgleich sich für unseren Verstand diese beiden Begriffe eigentlich gegenseitig ausschließen. Und doch hat die Entdeckung der Lichtquanten und der Materiewellen in anderer Hinsicht unsere Kenntnis von den Strahlen und dem Bau der Materie außerordentlich gefördert. Wir haben schon gesehen, daß sowohl für den lichtelektrischen Effekt wie für die Interferenzversuche mit Kathodenstrahlen das Plancksche Wirkungsquantum h von Wichtigkeit ist. Wir fassen heute alle Naturgesetze, die etwas mit dieser Konstanten zu tun haben, unter dem Namen der Quantentheorie zusammen. Die Quantentheorie hat es uns nun ermöglicht, unsere Vorstellungen über den Aufbau der Materie aus den Atomen und den Aufbau der Atome aus den Kernen und Elektronen sehr zu erweitern und zwar hauptsächlich in Zusammenhang mit einem Problem, das auch für uns hier sehr wesentlich ist, nämlich dem Problem der Lichtaussendung durch die Atome.

5. Entwicklung unserer Vorstellungen über die Lichtaussendung

Wir haben ja schon früher erwähnt, daß Licht entweder von einem erhitzten Körper ausgestrahlt wird oder von den Gasatomen oder Ionen in einem Entladungsgefäß ausgehen kann. Auch im ersten Fall geht das Licht natürlich irgendwie auf die Atome zurück, aus denen der feste leuchtende Körper aufgebaut ist; da im Gas aber die Atome viel freier sind und sich gegenseitig kaum beeinflussen, werden wir uns zunächst für das Leuchten eines Entladungsrohres interessieren müssen, wenn wir die Aussendung des Lichtes durch ein Einzelatom verstehen wollen. Wir füllen also eine kleine Entladungsröhre, eine sogenannte Geißlersche Röhre, mit verdünntem Wasserstoffgas und betrachten das weißliche Licht, das von dem Gas beim Durchgang eines elektrischen Stromes ausgesendet wird, durch ein Spektroskop. Wasserstoff haben wir gewählt, weil, wie wir wissen, das Wasserstoffatom das einfachste aller Atome ist, das nur aus dem Kern, dem Proton mit der Ladung 1, und einem Elektron aufgebaut wird.

Abb. 28. Das Wasserstoffspektrum

Das Spektrum des Wasserstoffes (s. Abb. 28) besteht genau wie das früher abgebildete Spektrum der Quecksilberlampe aus einzelnen scharfen Linien, d. h. also, das von dem leuchtenden Gas ausgestrahlte Licht setzt sich aus verschiedenen Lichtarten ganz bestimmter Wellenlänge oder ganz bestimmter Frequenz zusammen. Die Anordnung der Linien ist aber beim Quecksilber eine andere als beim Wasserstoff, denn jedes Element hat seine eigene Linienanordnung, sein eigenes Spektrum, durch das es sich von allen anderen unterscheidet. Man verwendet diese Tatsache, um aus dem Spektrum festzustellen, welche Atome in einer noch unbekannten chemischen Verbindung vorkommen (Spektralanalyse). Wir sehen nun aus unserer Figur, daß die einzelnen Linien im Wasserstoffspektrum besonders regelmäßig angeordnet sind, sie folgen sich in Abständen, die nach dem Violetten hin immer kleiner werden. Können wir nun aus diesen Gesetzmäßigkeiten irgendwie auf den Bau des Wasserstoffatoms zurückschließen?

Wir haben im ersten Abschnitt gehört, daß eine Rundfunkwelle von der Frequenz 1 Million, d. h. also von einer Million Schwingungen in der Sekunde, dadurch zustande kommt, daß der Strom in der Sendeantenne 1 Million mal in der Sekunde hin und her schwankt. Es ist nun naheliegend, anzunehmen, daß auch die den außerordentlich viel kürzeren Lichtwellen entsprechenden außerordentlich viel größeren Lichtfrequenzen von etwa 1000 Billionen Schwingungen in der Sekunde mit einer entsprechend viel schnelleren elektrischen Schwingung in Zusammenhang stehen. Und das Vorhandensein einer solchen Schwingung könnte man sich in einem das Licht aussendenden Atom auch gut vorstellen. Nehmen wir nämlich an, daß das Elektron im Wasserstoffatom um seinen Kern

kreist wie ein Planet um die Sonne, so können wir aus der bekannten Größe des Atoms ausrechnen, daß es sich in einer Sekunde auch etwa 1000 Billionen mal um den Kern drehen muß. Es führt also gerade eine Schwingung der richtigen Frequenz aus, um wie ein winziger Rundfunksender Wellen von der Länge der Lichtwellen ausstrahlen zu können. So schön diese Vorstellung zu sein scheint, läßt sie sich doch mit den Beobachtungen nicht recht in Einklang bringen. Damit das Elektron nicht durch die Anziehung des Kerns in diesen hineingezogen wird, muß es nämlich ständig in Bewegung sein und müßte demnach auch ständig Licht aussenden, und das ist sicher nicht der Fall, denn wir wissen ja, daß Wasserstoff für gewöhnlich nicht leuchtet. Auch läßt sich gerade die für das Wasserstoffatom charakteristische Anordnung der Frequenzen seines Spektrums in dieser Weise nicht verstehen.

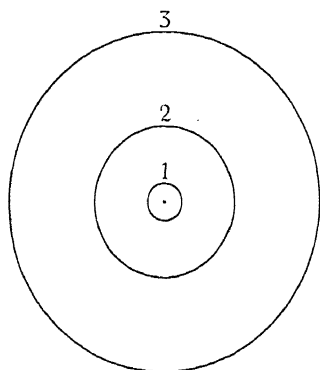



Abb. 29. Die Quantenbahnen im Wasserstoffatom

Im Jahre 1913 zog nun zuerst N. Bohr die Quantentheorie zur Erklärung des Wasserstoffspektrums heran und begründete damit die neuere Theorie vom Aufbau des Atoms und der Entstehung des Lichtes und der Röntgenstrahlen. Er nahm nämlich an, daß sich das Elektron um den Wasserstoffkern nur in ganz bestimmten Bahnen (Quantenbahnen) bewegen kann, die wir in der Abb. 29 mit 1 2 3 ... bezeichnet haben. Solange es sich in einer dieser Bahnen aufhält, sendet es im Gegensatz zur früheren Auffassung kein Licht aus. Geht es aber von einer weiter außen befindlichen Bahn in eine weiter innen liegende über, so wird jedesmal eine bestimmte Frequenz ausgestrahlt, und es entsteht z. B. beim Übergang aus der Bahn 3 in die Bahn 2 die rote Wasserstofflinie, beim Übergang von 4 in 2 die blaue Linie usw. Im nichtleuchtenden Wasserstoff befindet sich das Elektron immer in der innersten Bahn 1. Durch irgendwelche Einflüsse kann es dann in eine weiter außen liegende Bahn gehoben werden, was natürlich eine gewisse Energie erfordert, da ich ja das Elektron von dem anziehenden Kern wegbewegen muß. Das Elektron „fällt" dann von selbst wieder in eine der inneren Bahnen herunter und gibt dabei die aufgewandte Energie wieder ab und zwar eben in Form des ausgestrahlten monochromatischen Lichtes. Die Frequenz des Lichtes hängt mit der abgegebenen Energie genau so zusammen, wie wir es oben beim Photoeffekt gefunden haben: sie ergibt sich durch Division der Energie durch das Plancksche Wirkungsquantum h.

6. Die neuere Quantentheorie und die Ungenauigkeitsrelation

Die Bohrsche Vorstellung gestattet es, die Frequenzen aller Linien des Wasserstoffspektrums zu berechnen, und diese berechneten Frequenzen stimmen mit den wirklich gemessenen außerordentlich genau überein. Auch in der Deutung der anderen Spektren wurden durch die Annahme der Quantenbahnen große Fortschritte erzielt. Im einzelnen hat allerdings die Quantentheorie der Atome nach der Entdeckung der Welleneigenschaften des Elektrons im Jahre 1925 noch eine wesentliche Änderung und Vervollkommnung erfahren. Die Welleneigenschaft des Elektrons bringt es mit sich, daß wir es uns bei Bewegung in sehr kleinen Gebilden nicht mehr als ein Teilchen vorstellen dürfen, dessen Weg in seiner Bahn wir im einzelnen verfolgen können. Der uns von der Planetenbewegung her so geläufige Bahnbegriff muß also fallen gelassen werden. In der von Heisenberg und Schrödinger schließlich erreichten Verschmelzung der älteren Atomtheorie mit der Wellenauffassung wird das Wasserstoffatom ein Gebilde, in dem sich das Elektron in bezug auf den Kern mit größerer oder geringerer Wahrscheinlichkeit in jedem Abstand befinden kann. Kennzeichnend für das Atom und bestimmend für all seine Eigenschaften ist jetzt nur die mittlere Dichteverteilung der Elektronenladung geworden, welche der oben genannten Wahrscheinlichkeit entspricht.

Man muß sich nach Heisenberg mit dem Gedanken vertraut machen, daß in atomistischen Experimenten es nicht mehr möglich ist, von irgendeinem Teilchen gleichzeitig Lage und Geschwindigkeit mit absoluter Genauigkeit zu bestimmen. Nach der Heisenbergschen Ungenauigkeitsrelation liegt die tiefere Bedeutung des Planckschen Wirkungsquantums gerade darin, daß seine Größe die natürliche, untere, nicht überschreitbare Grenze für das Produkt der Ungenauigkeiten in der Ermittlung von Lage und Geschwindigkeit bestimmt. Trotzdem bleibt es auch mit diesem Verzicht möglich, in der modernen Atomtheorie auf alle durch das Experiment gestellten Fragen eine entsprechende Antwort zu erteilen.

7. Periodisches System der Elemente

Wenn wir vom Wasserstoff zu anderen Elementen übergehen, so wird die Erklärung der Spektren natürlich wesentlich schwieriger, weil wir es jetzt nicht mit einem, sondern mit vielen Elektronen zu tun haben, die sich bis zu einem gewissen Grade gegenseitig beeinflussen. Die Anordnung dieser Elektronen ist aber wieder durch besonders wunderbare Gesetze geregelt, die in dem sogenannten periodischen System der Elemente zum Ausdruck kommen. Der periodischen Anordnung der Elemente in diesem System entspricht der Schalenaufbau der Elektronenstruktur der Atome. Die erste dem Kern nächste Schale ist abge-

schlossen, sobald sie zwei Elektronen enthält und tritt deshalb zum ersten Male vollständig auf beim zweiten Element des periodischen Systems, dem Helium. Daß gerade zwei Elektronen nötig sind, um die einfachste vollständige Schale zu bilden, hängt mit einer Eigenschaft des Elektrons zusammen, welche erst spät erkannt wurde und deren Berücksichtigung es erst möglich machte, die Spektren komplizierter Elemente vollständig zu verstehen. Es hat sich gezeigt, daß man dem Elektron nicht nur eine Ladung und eine Masse, sondern auch ein magnetisches Moment und gleichzeitig damit einen Drall (gewöhnlich mit Spin bezeichnet) zuerkennen muß. Anschaulich gefaßt (unter der Annahme, daß eine solche Veranschaulichung noch zulässig ist), sollte man sich das Elektron im natürlichen Zustand als mit einer Rotation begabt vorstellen, die den Drall verursacht und gleichzeitig als eine Art Kreisstrom das magnetische Moment zustande bringt. Wenn zwei Elektronen in einer Schale wie beim Helium vereinigt sind, haben sie entgegengesetzten Drall und kompensieren sich damit auch in magnetischer Hinsicht gegenseitig.

Bekommt der Kern höhere Ladungen, so müssen weitere Elektronen dem Atom hinzugefügt werden und diese bilden die Bausteine für eine zweite Schale. Diese wird vollständig, wenn sie 8 Elektronen enthält. Dann sind wir bei demjenigen Element angekommen, das an 10. Stelle im periodischen System steht, nunmehr zwei vollständig abgeschlossene Schalen enthält und demnach wieder ein Edelgas ist. Es ist das Element Neon, dessen charakteristisches Leuchten jedem von den roten Reklameröhren her bekannt ist. Geht man vom Helium aus einen Schritt weiter durch Hinzufügen eines Elektrons oder vom Neon in ähnlicher Weise, so bekommt man jedesmal ein Element, welches mit dem neu hinzugefügten Elektron gerade eine weitere Schale zu bauen anfängt. Man hat im ersten Fall das Lithium, im zweiten Fall das Natrium erhalten, beides sogenannte Alkalimetalle, die leicht ein Elektron verlieren und dementsprechend dem Chemiker als typische einwertige Elemente bekannt sind. So fortfahrend baut sich das ganze periodische System auf, und es werden die Wertigkeiten wie überhaupt die chemischen Eigenschaften der Elemente in der Schalenstruktur des Elektronengebildes wiedergegeben.

8. Bandenspektren und Ramaneffekt

Aber nicht nur über die Anordnung der Elektronen im Atom, sondern auch über die Verbindung der Atome zu Molekülen können wir durch die Untersuchung der Spektren etwas erfahren. Denn nicht alle Arten von elektromagnetischer Strahlung entstehen bei dem Übergang der Schalenelektronen des Atoms aus einem Zustand höherer in einen Zustand geringerer Energie; die Entstehung der ultraroten Strahlung müssen wir im allgemeinen mit den Schwingungen der Atome in den Molekülen und mit der Rotation der Mole-

küle (eventuell kombiniert mit einem Elektronensprung) in Zusammenhang bringen. Auch hier wird eine bestimmte ultrarote Frequenz immer dann ausgestrahlt, wenn das Molekül aus einem Zustand größerer Schwingungs- oder Rotationsenergie in einen Zustand kleinerer Energie übergeht. Die Linien der entstehenden Spektren sind nach einem anderen Prinzip geordnet als die Atomspektren, sie zeigen eine Bandenstruktur und werden Bandenspektren genannt. Eine besondere Rolle spielen die Molekülbewegungen und insbesondere die Atomschwingungen noch beim sogenannten Rameneffekt. Es zeigt sich nämlich, daß Licht, welches z. B. von einer Flüssigkeit zerstreut wird, zwar zu einem großen Teil dieselbe Wellenlänge wie das Primärlicht hat. Ihm ist aber außerdem noch Licht zugemischt, dessen Wellenlänge dem Primärlicht gegenüber um bestimmte Beträge größer oder sogar auch kleiner sein kann. Es treten also neben der primären Linie sogenannte Ramanlinien auf, und die Anordnung dieser Linien ist für das streuende Molekül charakteristisch. Um diesen Effekt zu verstehen, braucht man nur daran zu denken, daß das eingestrahlte Lichtquant im Innern des Moleküls einen Teilbetrag seiner Energie verwenden kann, um etwa die Schwingungsbewegung der Atome zu verstärken und damit diesen Bewegungstypus in einen höheren Quantenzustand zu versetzen. Das ausgestrahlte Quant ist dann kleiner und damit seine Wellenlänge vergrößert worden. Ähnlich kann es vorkommen, daß das primäre Quant einen Teil der Schwingungsenergie aufnimmt und infolgedessen das Molekül mit kürzerer Wellenlänge verläßt. Neben den Bandenspektren spielt die Beobachtung des Rameneffektes eine wesentliche Rolle bei der Untersuchung von Atomschwingungen im Molekül und gibt daher Aufschluß über die Elastizität der chemischen Bindungen.

9. Die Anregung zum Leuchten

Wir verstehen aus der Vorstellung, die wir uns von der Entstehung des Lichtes gemacht haben, nun auch ohne weiteres, warum wir das Licht sowohl durch Erhitzung eines Körpers wie mit Hilfe elektrischer Kräfte in einem Leuchtrohr erzeugen können. Licht kann von einem Atom oder Molekül nur dann ausgestrahlt werden, wenn dieses vorher in einen Zustand höherer Energie gebracht wurde; das Atom oder Molekül muß, wie man sagt, angeregt werden. Diese Anregung kann nun z. B. durch die Zusammenstöße der Atome infolge ihrer Wärmebewegung erfolgen, und es ist leicht einzusehen, daß ein Elektron um so häufiger in einen angeregten Zustand kommen wird, je schneller sich die Atome bewegen und mit desto größerer Wucht sie daher zusammenstoßen. Da aber die Schnelligkeit der Atombewegung nur von der Wärme abhängt, muß also in einem stark erhitzten Körper die Anregung der Atome und damit die Lichtaussendung viel stärker sein als in einem kalten, bei dem unter Umständen überhaupt keine Anregung möglich ist. Sehr viel größere Geschwindigkeiten als durch die Wärme-

bewegung erhalten aber die Ionen und Elektronen in einem Entladungsgefäß durch die beschleunigende Wirkung der elektrischen Spannung. Wir werden daher erwarten, daß in einem Entladungsgefäß noch Elektronen angeregt werden können, die man einfach durch Erhitzung eines Körpers nie anregen könnte. Tatsächlich entsprechen die Geschwindigkeiten der Ionen und Atome in einem Entladungsrohr, an dem eine Spannung von 10000 Volt liegt, den thermischen Energien der Atome in einem Stoff von 100 Millionen Grad Wärme! Übrigens steht auch die Tatsache, daß in einem Entladungsgefäß die Atome vielfach durch Abspaltung von Elektronen ionisiert werden, in einem engen Zusammenhang mit der Anregung. Denn eine Ionisierung ist ja eigentlich nichts anderes als ein Grenzfall der Anregung, bei dem das Elektron nicht nur in eine weiter außen liegende Schale gelangt, sondern vollkommen vom Atom losgerissen wird. Sowohl Anregung als Ionisierung können außer durch thermische und elektrische Kräfte auch durch Licht und andere Wellenstrahlung hervorgerufen werden, wir haben ja oben im Photoeffekt schon eine Erscheinung kennengelernt, bei der eine Lostrennung von Elektronen, also eine Ionisation, durch Licht bewirkt wird. Die Anregung durch Licht spielt bei allen Fluoreszenzerscheinungen eine Rolle, bei denen ja durch Bestrahlung eines Stoffes mit Licht einer Frequenz dieser zur Aussendung von Licht anderer Frequenz angeregt wird.

Die Elektronen, die bei einem schweren Atom in einer der inneren, dem Kern näheren Schalen liegen, werden durch den Kern mit sehr viel größeren Kräften gehalten als die außen liegenden Elektronen. Ich brauche daher auch sehr viel größere Energien, wenn ich ein inneres Elektron anregen, also in eine äußere Schale bringen will. Umgekehrt wird aber das Licht, das beim Zurückfall eines Elektrons in eine innere Schale ausgestrahlt wird, auch eine größere Frequenz also kleinere Wellenlänge haben als Licht, das bei Bewegung eines äußeren Elektrons entsteht. Denn nach der Quantentheorie entspricht ja einer größeren Energie stets eine größere Frequenz. Damit verstehen wir nun auch, daß das Licht, das ein heißer Körper ausstrahlt, immer mehr blau, violett und endlich ultraviolett enthält, je mehr ich den Körper erhitze, also die Bewegungsenergie seiner Moleküle erhöhe. Man sieht aber auch ein, daß wir selbst mit den höchsten heute herstellbaren Temperaturen niemals kurzwellige ultraviolette Strahlen oder gar Röntgenstrahlen erzeugen können, die dazu nötigen Energien kann man nur durch Beschleunigung elektrisch geladener Teilchen in einem Entladungsrohr bekommen. Die scharfen Linien der Röntgenstrahlen mit ihren hohen Frequenzen entstehen durch Übergänge der Elektronen zwischen den allerinnersten Schalen eines Atoms. Diese dem Kern nächsten Elektronen können nur angeregt werden, wenn sie von sehr schnellen energiereichen Teilchen getroffen werden, deshalb müssen wir auch an unsere Röntgenröhre Spannungen von mehr als 100000 Volt legen, um den anregenden Kathodenstrahlen eine ausreichende Geschwindigkeit zu erteilen.

10. Das Problem des Kernaufbaues

Es gibt ja aber in den γ-Strahlen der radioaktiven Substanzen eine Strahlung von noch kleinerer Wellenlänge, also noch größerer Frequenz als die Röntgenstrahlen. Auch die Energie der innersten Elektronen der schwersten Elemente reichen lange nicht dazu aus, um die hohen Frequenzen der γ-Strahlen hervorzubringen. Es bleibt daher nichts übrig, als die Entstehung der γ-Strahlen mit dem Atomkern in Zusammenhang zu bringen, und wir stehen dann vor der Frage, ob denn der Kern eines Atoms auch wieder aus einzelnen Teilchen zusammengesetzt ist, durch deren Bewegung eine Strahlung entstehen könnte. Da, wie wir gesehen haben, viele radioaktive Substanzen Heliumkerne in Form von α-Teilchen ausschleudern und diese Heliumkerne als schwere Teilchen nur aus dem Kern des zerfallenden Atoms gekommen sein können, scheint es wenigstens bei diesen schweren radioaktiven Kernen recht wahrscheinlich, daß sie aus kleineren Teilen bestehen, wenn man nicht annehmen will, daß sich das α-Teilchen erst im Augenblick des Zerfalls irgendwie neu bildet.

Es gibt aber noch eine andere viel länger bekannte Tatsache, die für einen Aufbau des Kerns aus kleineren Einheiten spricht: nämlich die ziemlich genaue Ganzzahligkeit vieler Atomgewichte. So beträgt z. B., wenn man das Gewicht des Sauerstoffatoms mit 16,00 bezeichnet, das Gewicht des Stickstoffes 14,01, des Kohlenstoffes 12,00, des Heliums 4,00 und des Wasserstoffes 1,01. Diese Gesetzmäßigkeit führte schon Prout 1815 zu der Vermutung, daß letzten Endes alle Atome aus dem leichtesten, dem Wasserstoff bestehen könnten, und das würde heute, wo wir wissen, daß praktisch die ganze Masse des Atoms im Kern vereinigt ist, bedeuten, daß alle Kerne aus dem leichtesten Kern, dem Proton, aufgebaut sind. Da es aber auch manche Atome gibt, die ganz aus der Ganzzahligkeitsregel herausfallen, wie z. B. das Chlor mit dem Gewicht 35,46, wurde die Proutsche Annahme erst von wirklicher Bedeutung, als man durch eine neue Entdeckung den Grund für die groben Abweichungen von der Ganzzahligkeit erkannt hatte.

11. Die Isotopie (Massenspektrograph)

Es kommt beim Zerfall der radioaktiven Substanzen manchmal vor, daß ein Element zunächst ein α-Teilchen und dann zweimal hintereinander ein β-Teilchen aussendet. Da sich nun die großen Geschwindigkeiten der β-Teilchen nur dadurch erklären lassen, daß auch sie, genau wie die α-Teilchen, vom Kern ausgeschleudert werden, hat der Kern nach diesen Vorgängen wieder genau die gleiche Ladung wie zuvor, denn das α-Teilchen trägt ja doppelt positive und jedes der beiden β-Teilchen als Elektron einfache negative Ladung. Die Masse des Kerns hat sich dagegen um 4 Einheiten verkleinert, denn die Masse der beiden β-Teilchen brauchen wir neben der 4000 mal größeren des α-Teilchens nicht zu rechnen.

Obgleich nun also das Atomgewicht der neuen Substanz um 4 kleiner ist als das Atomgewicht der Ausgangssubstanz, erweisen sich beide Elemente in allen chemischen Eigenschaften so vollständig gleich, daß sie sich mit chemischen Mitteln auf keine Weise trennen lassen. Wir müssen daraus schließen, daß die chemischen und übrigens auch die meisten physikalischen Eigenschaften eines Elementes von seinem Atomgewicht gar nicht abhängen, sondern nur von der Ladung des betreffenden Atomkerns, und wir können uns nach dem, was wir oben über den Schalenaufbau der Atome gehört haben, auch denken, warum das so ist. Denn die Anzahl der in den einzelnen Elektronenschalen eines Atoms vorhandenen Elektronen richtet sich ja nur nach der Größe der positiven Ladung des Kerns, und wir wissen, daß durch die Zahl und die Anordnung der Elektronen alle chemischen Eigenschaften des Atoms, seine Größe und z. B. auch sein Spektrum bestimmt sind.

Man bezeichnet zwei Elemente, deren Kerne die gleiche Ladung, aber verschiedene Masse besitzen, als Isotope, weil sie im periodischen System der Elemente wegen ihrer gleichen Eigenschaften an die gleiche Stelle gehören. Nachdem man einmal das Vorkommen isotoper Elemente erkannt hatte, schien es möglich, daß die Isotopie auch bei den leichteren, nicht radioaktiven Atomen vorkommt, und man konnte das prüfen, indem man die Massen der verschiedensten Atome mit Hilfe der Kanalstrahlmethode bestimmte. Wir haben früher gesehen, daß wir in einem Entladungsgefäß die Atome beliebiger Elemente durch Abspaltung von Schalenelektronen in geladene Ionen verwandeln können und daß sich durch elektrische und magnetische Ablenkung solcher Kanalstrahlteilchen für sie das Verhältnis von Ladung zu Masse und damit ihre Masse bestimmen läßt. Aston konstruierte einen Apparat, den Massenspektrographen, in dem es durch geschickte Kombination der beiden oben genannten Ablenkungen so eingerichtet ist, daß der zu untersuchende Teilchenstrahl in Einzelstrahlen je vom gleichen Verhältnis Ladung zu Masse getrennt wird. Auf eine photographische Platte zeichnet dann jeder Einzelstrahl einen Strich, so daß man ein Linienbild wie eine Spektralaufnahme bekommt, von dem jede Linie einem ganz bestimmten Verhältnis Ladung zu Masse entspricht (Abb. 30). Man fand auf diese Weise, daß sehr viele von den Elementen, die man sich ja bisher alle aus lauter Atomen von gleichem Gewicht bestehend dachte, zwei oder sogar mehr Atomarten verschiedenen Gewichtes enthalten, daß sie also aus Isotopen zusammengesetzt sind. Besonders wichtig aber war die Tatsache, daß das Gewicht der Einzelisotopen sich immer ziemlich genau ganzzahlig ergab und daß damit klar wurde, daß unganzzahlige Atomgewichte nur durch Mischung verschiedener Atome mit ganzzahligem Gewicht entstehen. So erwies sich z. B. Chlor aus zwei Atomarten von den Gewichten 35 und 37 zusammengesetzt, das Gewicht 35,46 kommt also nur dadurch zustande, daß es etwa 4mal mehr Chloratome vom Gewicht 35 als vom Gewicht 37 gibt. Prinzipiell ist es natürlich möglich, durch Trennung der beiden Isotopen Chlor mit dem Atomgewicht 35 oder Chlor mit dem

Atomgewicht 37 herzustellen, nur ist eine Trennung von Isotopen in größerem Maßstabe (in sehr winzigen Mengen werden sie ja im Massenspektrographen durch die elektrischen und magnetischen Kräfte wirklich getrennt) wegen ihres ganz gleichen chemischen Verhaltens sehr schwer und bei Elementen mit größerem Atomgewicht bisher kaum möglich. Bei leichteren Elementen hat man aber schon eine ziemlich vollkommene Trennung von Isotopen erreicht, besonders schön beim leichtesten Element: dem Wasserstoff. Man hat bei ihm ein seltenes Isotop vom Gewicht 2 gefunden, das man durch verschiedene Verfahren ziemlich rein herstellen kann, obgleich im gewöhnlichen Wasserstoff nur etwa jedes 5000. Atom ein Atom vom Gewicht 2 ist. Der Kern des schweren Wasserstoffisotopes ist besonders interessant, weil er nächst dem Proton der leichteste Kern ist und wie dieses die Ladung 1 hat (sonst wäre es ja kein Wasserstoffkern), man bezeichnet ihn heute meist als Deuton.

Abb. 30. Massenspektrogramme der Elemente Zink, Germanium und Tellurium
Aus Aston, Mass Spectra and Isotopes

Durch die Entdeckung der Isotopie und durch den Nachweis der Ganzzahligkeit der Gewichte aller Einzelatome ist die Annahme, daß alle Kerne aus kleineren unter sich gleichen Teilen zusammengesetzt sind, recht wahrscheinlich geworden. Nur aus Protonen allein können die Kerne allerdings sicher nicht bestehen, da ja ihre Ladung sonst genau so groß sein müßte wie ihre Masse. Die Ladung ist aber schon beim Deuton und beim Heliumkern nur halb so groß wie die Masse (Helium: Masse 4 Ladung 2) und bei den schwersten Kernen wird das Verhältnis noch ungünstiger (Uran: Masse 238 Ladung 92). Es müssen also neben den Protonen im Kern auch ungeladene oder negativ geladene Teilchen existieren.

12. Die Kernumwandlung

Die weitere Erforschung der Bestandteile des Atomkerns konnte aber wirklich große Fortschritte erst erzielen, als es im Jahre 1919 zuerst Rutherford gelungen war, einen Atomkern künstlich in einen anderen überzuführen. Rutherford ließ schnelle α-Teilchen einer radioaktiven Substanz durch Stickstoffgas hindurchtreten und beobachtete, daß aus dem Gas zuweilen sehr schnelle Protonen

also Wasserstoffkerne, herauskamen, die wegen ihrer sehr großen Energie nur bei dem Zusammenstoß eines α-Teilchens mit einem Kern entstanden sein konnten. Der Vorgang konnte später auch in der Wilsonschen Nebelkammer photographiert werden (Tf. 2, Abb. 31). Man sieht, daß eine von einem α-Teilchen herrührende Bahn an einer Stelle plötzlich aufhört und daß von dieser Stelle zwei neue Bahnen nach verschiedenen Richtungen ausgehen, eine kurze dicke und eine längere dünne Spur. Man muß sich vorstellen, daß das α-Teilchen ziemlich genau auf die Mitte eines Stickstoffkerns getroffen ist und dabei in diesen Kern eindrang. Bei diesem Vorgang wird von dem Kern ein Proton ausgeschleudert, und es bleibt daher nun ein Kern übrig, dessen Gewicht um 3 größer ist als das Atomgewicht des Stickstoffes, der also, da Stickstoff das Atomgewicht 14 besitzt, das Gewicht 17 haben muß. Das Atom vom Gewicht 17 ist aber ein Sauerstoffatom, ein seltenes Isotop des normalen Sauerstoffes vom Gewicht 16; die kurze dicke Spur, die von der Zusammenstoßstelle ausgeht, rührt von diesem neu gebildeten Sauerstoffatom her, das durch den Stoß des α-Teilchens in Bewegung gesetzt wurde, die lange dünne Spur wurde von dem mit $^1/_7$ Lichtgeschwindigkeit dahinfliegenden Proton erzeugt.

Es ist also, wie uns dieser Versuch zeigt, wirklich möglich, die Atome, die man zunächst für die unveränderlichen Grundbestandteile aller Materie gehalten hatte, künstlich zu zerstören und in andere Atome überzuführen; gleichzeitig wissen wir jetzt sicher, daß auch in schweren Kernen Wasserstoffkerne, also Protonen, vorkommen, da ja das α-Teilchen ein Proton aus dem Stickstoffkern herausgeschossen hat. Die Versuche bestätigen uns aber auch, daß die Kräfte, durch die die Teilchen in einem Atomkern zusammengehalten werden, sehr groß sind, da wir erst durch die sehr energiereichen α-Teilchen und auch dann nur sehr selten eine Umwandlung eines Stickstoffkerns erreichen konnten. Man muß nämlich mit der Nebelkammer 50000 Bahnen von α-Teilchen photographieren, ehe man hoffen kann, eine einzige mit einem schnellen Proton unter ihnen zu finden. Daß die Kräfte im Atomkern besonders groß sein müssen, war ja schon wegen der großen Energie der aus den radioaktiven Kernen kommenden α-, β- und γ-Strahlen und wegen der großen Stabilität der Atome zu erwarten.

Eine Atomumwandlung (oder, wie man weniger zutreffend heute oft sagt, eine Atomzertrümmerung) durch schnelle α-Teilchen konnte außer bei Stickstoff auch bei verschiedenen anderen leichten Elementen erzielt werden. Man versuchte nun, ob es nicht möglich sei außer α-Teilchen auch Protonen oder Deutonen, die man in einem Kanalstrahlrohr durch sehr hohe Spannungen künstlich auf eine große Geschwindigkeit gebracht hatte, als Geschosse für die Umwandlung von Atomkernen zu verwenden. Diese Versuche hatten tatsächlich einen positiven Erfolg, und überraschenderweise genügten sogar schon verhältnismäßig kleine Energien, um in manchen Fällen einen Kernzerfall hervorzubringen: er trat schon ein, wenn die Protonen durch eine Spannung von etwa 100000 Volt beschleunigt

worden waren, während die α-Teilchengeschwindigkeiten einer Spannung von 8 Millionen Volt entsprechen. Daß man schon mit verhältnismäßig geringen Energien einen Kern umwandeln kann, dessen innere Kräfte eigentlich viel größeren Energien entsprechen, ist eine Tatsache, die man nur mit Hilfe der Quantentheorie verstehen kann, und die mit den Welleneigenschaften der Materieteilchen zusammenhängt. Das Proton ist hierbei sehr im Vorteil, weil es nur einfach positiv geladen ist und von dem positiven Kern weniger abgestoßen wird als das doppelt geladene α-Teilchen. Einer der bekanntesten hierhergehörigen Prozesse ist die Umwandlung des Elementes Lithium vom Atomgewicht 7 durch Beschießung mit Protonen; der Lithiumkern nimmt das Proton auf und zerfällt sofort in zwei α-Teilchen (Gewicht 4), die nach entgegengesetzten Seiten auseinanderfliegen (Tf. 2, Abb. 32). Der Vorgang verläuft hier also gerade umgekehrt wie bei der Stickstoffumwandlung: das Proton wird aufgenommen und die α-Teilchen ausgeschleudert.

13. Die Neutronen

Außer Protonen und α-Teilchen kann aber aus den Kernen bei den Umwandlungsversuchen noch ein drittes Teilchen herausgeschossen werden, das erst in den letzten Jahren (1930—1932) entdeckt worden ist. Bothe fand nämlich, daß bei Beschießung von Beryllium mit α-Teilchen von diesem eine sehr durchdringende Strahlung ausgeht, welche man zunächst als γ-Strahlung ansah. Die spätere Untersuchung des Ehepaares Joliot-Curie und Chadwicks zeigte aber, daß man es hier mit einem neuartigen Teilchen zu tun hatte, welches weite Strecken in der Materie zurücklegen kann, ohne wesentliche Wirkungen hervorzubringen, am Ende seiner Bahn aber imstande ist, in einem Einzelprozeß große Energie an andere Kerne zu übertragen. Diese Eigenschaften werden gedeutet durch die jetzt allgemein angenommene Hypothese, daß man es hier mit sogenannten Neutronen zu tun hat, d. h. mit ungeladenen Teilchen, deren Masse sich durch genauere Versuche nahezu gleich der Protonenmasse ergeben hat. Die nebenstehende Figur (Tf. 2, Abb. 33) zeigt eine Wilsonnebelaufnahme, bei der scheinbar unvermittelt eine Protonenspur entsteht. In Wirklichkeit gehen durch die Kammer Neutronenstrahlen, welche, da die Neutronen ungeladen sind, an sich keine Wirkungen hervorbringen, deren Existenz uns aber in dem Augenblick verraten wird, in dem sie etwa auf einen Wasserstoffkern auftreffen und diesen in Bewegung setzen. Auf das Fehlen der Ladung ist auch die besonders große Durchdringungsfähigkeit des Neutrons zurückzuführen; es wird nicht wie das Elektron, Proton oder α-Teilchen durch die elektrischen Kräfte der Atome, an denen es vorbeifliegt, gebremst. Da das Neutron in den letzten Jahren bei vielen Kernumwandlungsprozessen nachgewiesen werden konnte, müssen wir in ihm auch einen Kernbestandteil sehen, ja es scheint heute sogar recht wahrscheinlich, daß es außer dem

Proton der einzige ist, daß also alle Kerne im Grunde nur aus Protonen und Neutronen zusammengesetzt sind. Ladung und Masse aller Kerne lassen sich unter dieser Annahme natürlich immer richtig darstellen. Das Deuton besteht z. B. aus einem Proton und einem Neutron und hat daher die Ladung 1 und die Masse 2; der Heliumkern besteht aus 2 Protonen und 2 Neutronen (Masse 4, Ladung 2) usw. bis zum schwersten Urankern, der 92 Protonen und 146 Neutronen enthält. (Masse 238). Das α-Teilchen ist also nach dieser Auffassung auch aus leichteren Bestandteilen zusammengesetzt, ist aber ein besonders stabiler Kern, der wahrscheinlich auch in schwereren Kernen noch eine Rolle spielt. Wenigstens spricht die Tatsache, daß aus den radioaktiven Kernen α-Teilchen herauskommen, dafür, daß auch in schweren Kernen je 2 Protonen und 2 Neutronen zu α-Teilchen zusammengefaßt sind.

14. Masse und Energie

Die besonders große Stabilität des α-Teilchens läßt sich auch noch auf einem anderen sehr eigenartigen Wege erkennen. Wir haben bisher angenommen, daß sich die Abweichungen der Atomgewichte von der Ganzzahligkeit vollkommen damit erklären lassen, daß die Elemente aus Mischungen verschiedener Isotope mit ganzzahligen Gewichten bestehen. Bestimmt man aber die Atomgewichte mit dem Massenspektrographen, der uns ja unmittelbar die Masse der einzelnen Isotopen liefert, so bleiben immer noch kleine Abweichungen von der Ganzzahligkeit bestehen. Bezeichnet man das Atomgewicht des häufigsten Sauerstoffisotopes mit 16,0000, so findet man für das Wasserstoffisotop vom Gewicht 1 die genaue Masse 1,0081, für das Helium vom Gewicht 4 die genaue Masse 4,0034 und Abweichungen ähnlicher Größe auch in anderen Fällen. Es hat sich nun gezeigt, daß diese Abweichungen eine sehr tiefe Bedeutung haben, und daß man aus ihnen etwas über die inneren Energien der Atomkerne erfahren kann. Nach einer allgemeinen Beziehung der Relativitätstheorie entspricht nämlich jeder Masse ganz allgemein eine gewisse Energiemenge, die man leicht ausrechnen kann, indem man diese Masse mit dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit multipliziert. Von der ungeheuren Energie, die nach diesem Gesetz schon in kleinen Mengen Materie enthalten ist, machen wir uns eine Vorstellung, wenn wir die Energie berechnen, die der Masse eines einzigen Gramms gleichkommt; sie beträgt 25 Millionen Kilowattstunden und wird von einem großen Kraftwerk wie dem Walchenseewerk erst im Dauerbetrieb einer Woche erzeugt.

Die zwischen Masse und Energie bestehende Beziehung gestattet es uns nun, die kleinen Abweichungen der Isotopengewichte von der Ganzzahligkeit durch die großen in den Atomkernen steckenden Energien zu erklären. Eine Änderung des Gewichtes eines Kerns um 0,001 Atomgewichtseinheit entspricht nämlich ziemlich genau einer Energie, wie man sie einem Elektron oder Proton durch Beschleu-

nigung mit Hilfe einer Spannung von 1 Million Volt erteilen kann. Wenn daher z. B., wie wir aus den eben mitgeteilten Zahlen sehen, ein Heliumkern um etwa 0,030 Einheiten leichter ist als 4 Protonen oder als 2 Protonen und 2 Neutronen (das Neutron hat nach den neuesten Messungen auch etwa die Masse 1,008), so heißt das, daß man ihn erst durch Geschosse mit einer Energie von etwa 30 Millionen Volt in seine Bestandteile zerlegen könnte. Denn die hinzugefügte Energie entspricht dann gerade einer Vergrößerung der Masse um 0,030 Einheiten, und diese Vergrößerung ist nötig, damit die Masse der 4 Einzelteilchen herauskommt. In gleicher Weise lassen sich immer aus der Abweichung der Masse der Kerne von der Summe der Massen aller in ihm enthaltenen Teilchen (man bezeichnet die Abweichung als Massendefekt) Schlüsse auf die Energie ziehen, mit der diese Einzelteilchen im Kern zusammengehalten werden. Es ergibt sich auch auf diesem Weg, daß der Heliumkern, das α-Teilchen, ein besonders stabiler Kern ist, da z. B. der Massendefekt des Deutons nur 0,002 Einheiten beträgt, also der Energie von Protonen von 2 Millionen Volt entspricht.

Eine direkte experimentelle Bestätigung erhielt die Masse-Energie-Beziehung durch die Kernumwandlungsversuche. So ist z. B. bei der oben erwähnten Beschießung von Lithiumatomen mit Protonen die Masse des Lithiums und die Masse des Protons zusammen um etwa 0,018 Einheiten größer als die Masse der beiden neu entstehenden α-Teilchen. Diesem Massenüberschuß entspricht also eine Energie jedes der beiden α-Teilchen von etwa 9 Millionen Volt. Tatsächlich findet man aber durch Bestimmung der Reichweite der α-Teilchen für sie eine Energie der gleichen Größenordnung und kann also sagen, daß sich ein Teil der Masse des Lithiums und des Protons in die Bewegungsenergie der α-Teilchen umgesetzt hat.

15. Künstliche Radioaktivität

Das Neutron kann ebenso wie das α-Teilchen oder das Proton als Geschoß für Kernumwandlungsversuche verwendet werden, wie das zuerst von Fermi gemacht wurde; es ist dazu sogar besonders gut geeignet, weil es als ungeladenes Teilchen von den beschossenen Kernen nicht abgestoßen wird und daher auch in schwere Kerne mit großer positiver Ladung eindringen kann. Bei solchen durch Neutronen und geladene Teilchen bewirkten Kernumwandlungen fand man aber in der letzten Zeit noch einen neuen sehr interessanten Vorgang: es entstanden nämlich ziemlich häufig radioaktive Elemente, deren Kerne wie die der uns schon bekannten schweren radioaktiven Substanzen eine Strahlung aussenden und sich dabei in einen anderen Kern umwandeln. Das erste Beispiel dieser Art war die von dem Ehepaar Joliot-Curie entdeckte Erzeugung von radioaktivem Stickstoff durch Beschießung von Bor mit α-Strahlen. Ein anderes Beispiel, bei dem aber Neutronen als Geschosse verwendet wurden, ist die Bil-

dung von radioaktivem Natrium. Bestrahlt man nämlich gewöhnliches Natrium, ein Element mit dem Atomgewicht 23 und der Kernladung 11, eine Zeitlang mit Neutronen, so kann man nachweisen, daß hinterher von der bestrahlten Probe β-Teilchen, also schnelle Elektronen, ausgeschleudert werden. Diese β-Strahlung klingt genau wie etwa die Strahlung der Radium-Emanation mit der Zeit ab, sie ist etwa nach 15 Stunden auf die Hälfte ihrer ursprünglichen Stärke abgesunken. Die Substanz, von der die β-Strahlung ausgeht, ist ebenfalls Natrium, aber ein schweres Isotop des gewöhnlichen Natriums. Denn durch Eindringen des ungeladenen Neutrons in den Natriumkern wird dessen Ladung 11 nicht geändert, wohl aber sein Gewicht von 23 auf 24 heraufgesetzt. Das Natriumisotop vom Gewicht 24 ist bei der Untersuchung der Elemente auf Isotopie nie gefunden worden, und wir sehen jetzt auch warum; es ist ein instabiles Element, dessen Kern sich durch Aussendung von β-Teilchen in einen anderen Kern verwandelt und zwar in einen Magnesiumkern vom Gewicht 24. Das Element Magnesium hat nämlich die Kernladung 12, und das Ausschleudern eines Elektrons mit der negativen Ladung 1 aus dem Kern des radioaktiven Natriums kommt auf dasselbe heraus, als ob ich ihm die positive Ladung 1 hinzugefügt hätte. Wir haben damit einen stabilen Kern erhalten, denn das Magnesiumatom vom Gewicht 24 ist das häufigste von den 3 Magnesiumisotopen mit den Gewichten 24, 25 und 26.

Der hier beschriebene Prozeß, bei dem sich ein Neutron einfach an den Kern anlagert, ist nicht der einzig mögliche, er tritt sogar nur dann recht in Erscheinung, wenn man die Geschwindigkeit der benutzten Neutronen genügend heruntergesetzt hat. Das geschieht in einfacher Weise dadurch, daß man das Präparat samt der Neutronenquelle mit einem dichten Wassermantel umgibt; die Neutronen haben dann durch Zusammenstöße mit den vorhandenen Wasserstoffkernen ihre Geschwindigkeit zum allergrößten Teil verloren. Wenn Neutronen normaler Geschwindigkeit auf Kerne treffen, dann tritt gewöhnlich eine Zertrümmerung ein.

In solcher Weise hat man bei Kernumwandlungen eine große Anzahl von anderen instabilen, radioaktiven Elementen erhalten, die mit verschiedener Geschwindigkeit (oft schon innerhalb weniger Minuten) durch Aussendung von Strahlen in ein stabiles Element übergehen. Bei dieser sogenannten künstlichen Radioaktivität treten aber nicht nur β-Strahlen auf. So liefert z. B. das Radionatrium, das wir oben kennengelernt haben, neben der β-Strahlung auch noch γ-Strahlen, die noch kurzwelliger und damit noch durchdringender sind als die kurzwelligsten γ-Strahlen der natürlichen radioaktiven Substanzen. Wir können uns vorstellen, daß eine γ-Strahlung immer dann entsteht, wenn sich die Bestandteile des Kerns, also die Protonen oder Neutronen, irgendwie umlagern, ebenso wie das gewöhnliche Licht oder die Röntgenstrahlen beim Übergang der äußeren Elektronen eines Atoms aus einer Schale in die andere zustande kommen.

Die Möglichkeit der künstlichen Herstellung starker radioaktiver Substanzen und die Anregung durchdringender γ-Strahlen sind wohl bisher wegen der biologischen und medizinischen Bedeutung der Radioaktivität als die größten praktischen Erfolge der Kernumwandlungsversuche zu buchen. Denn man darf nicht denken, daß diese Versuche etwa dazu benützt werden können, um unedles Metall mit Vorteil in ein wertvolles zu verwandeln oder um große Energien zu gewinnen. Infolge der großen elektrischen Energien, die wir zur Beschleunigung der „Geschosse" brauchen, und infolge der sehr geringen Anzahl der „Kerntreffer" ist die Atomumwandlung vorläufig so unrentabel, daß man etwa zur Erzeugung von Gold sehr viel mehr Geld aufwenden müßte, als es dem Wert des zu gewinnenden Goldes entspricht.

16. Das Positron

Die künstlichen radioaktiven Elemente senden nicht alle wie das Radionatrium Elektronen aus; man kann durch Beschießung von Kernen mit α-Teilchen, Deutonen oder Protonen auch radioaktive Substanzen erhalten, die ein bisher nicht erwähntes Teilchen ausstrahlen, das ebenso wie das Neutron erst im Jahre 1932 entdeckt wurde. Dieses Teilchen hat dieselbe kleine Masse wie ein Elektron, ist aber positiv geladen und wird daher als positives Elektron oder Positron bezeichnet. Die Positronen erzeugen z. B. in einer Nebelkammer Spuren, die vollkommen genau so aussehen wie die Spuren der Elektronen, die aber von einer magnetischen Kraft nach der entgegengesetzten Seite abgelenkt werden, wie es bei einem positiv geladenen Teilchen sein muß. Die Positronen wurden zuerst von Anderson bei der Untersuchung der sogenannten Höhenstrahlung gefunden, einer außerordentlich durchdringenden Strahlung, die aus dem Weltenraum zu uns kommt und die Elektronen, Protonen und anderen Materieteilchen, auf die sie auftrifft, erstaunlich große Energien zu erteilen vermag. Wir brauchen auf die Höhenstrahlung hier nicht näher einzugehen, weil ihr ein besonderer Beitrag dieses Buches gewidmet ist; wir können nur erwähnen, daß sie entweder eine Teilchenstrahlung sehr großer Energie oder eine Wellenstrahlung besonders kleiner Wellenlänge sein muß, über deren Entstehung wir noch nichts wissen.

Wie kommt es nun aber, daß wir von der Existenz der positiven Elektronen erst so spät etwas gemerkt haben, während wir den negativen Elektronen ständig begegnet sind? Der Grund liegt darin, daß die Positronen nur ganz kurze Zeit bestehen können, weil sie sich immer sehr bald wieder mit irgendeinem gewöhnlichen Elektron vereinigen und dabei ihre Ladung verlieren. Man würde dann aber vermuten, daß dabei ein ungeladenes Teilchen mit der doppelten Masse eines Elektrons entstehen müßte. Tatsächlich wissen wir aber ziemlich sicher, daß die Masse der beiden Teilchen gleichzeitig mit ihrer Ladung voll-

kommen verschwindet und daß dafür eine elektromagnetische Strahlung sehr kurzer Wellenlänge, also ein γ-Strahlung, neu entsteht. Diese überraschende Erscheinung steht wieder in Zusammenhang mit der Massen-Energie-Beziehung der Relativitätstheorie.

Berechnen wir nach dieser Beziehung die Energiemenge, die der Masse eines Elektrons entspricht, und bestimmen durch Verwendung des Planckschen Wirkungsquantums die zu dieser Energie gehörende Frequenz, so erhalten wir genau die gleiche γ-Strahlfrequenz, die bei der Vereinigung von Positronen mit Elektronen beobachtet wurde. Wir können daher kaum daran zweifeln, daß wir es hier mit einer völligen Vernichtung der Materie zu tun haben: die Masse der Elektronen hat sich in die Strahlungsenergie der γ-Strahlen verwandelt. Aber auch der umgekehrte Vorgang ist beobachtet worden. Läßt man nämlich γ-Strahlen in eine Nebelkammer fallen, so kann man zuweilen die Bahnen eines Elektrons und eines Positrons beobachten, die von einem Punkt ausgehen (Tf. 2, Abb. 34) (man erkennt die Natur der Teilchen daran, daß ihre Bahnen vom Magneten in verschiedener Richtung gekrümmt werden), und diese Paare entstehen erst dann, wenn die Energie der γ-Strahlen (also die Frequenz) so groß ist, daß sie nach der Beziehung zwischen Masse und Energie gerade der Masse des Elektrons und des Positrons zusammen entspricht. Es gibt also neben der Zerstrahlung der Materie auch eine Materialisierung von Strahlung, eine Bildung von Elektronen und Positronen aus den mit Lichtgeschwindigkeit sich ausbreitenden γ-Strahlen.

Die neue Entstehungsmöglichkeit für die Elektronen und Positronen, die wir damit kennengelernt haben, macht uns auch die Tatsache etwas verständlicher, daß von vielen natürlichen und allen künstlichen radioaktiven Kernen Elektronen oder Positronen ausgeschleudert werden, obgleich wir uns die Kerne doch nur aus schweren Teilchen: aus Protonen und Neutronen zusammengesetzt dachten. Die Aussendung eines Positrons ist wegen der damit verbundenen Verringerung der positiven Ladung des Kerns immer gleichbedeutend mit der Verwandlung eines Protons in ein Neutron, umgekehrt entspricht der Ausstrahlung eines Elektrons die Umsetzung eines Neutrons in ein Proton. Wie man sich diesen Vorgang im einzelnen zu denken hat, wissen wir heute noch nicht, vielleicht steht er mit der Bildung von Elektronen und Positronen aus Strahlung in einem Zusammenhang. Man hat aus gewissen Gründen auch vermutet, daß beim β-Zerfall der Kerne außer den Elektronen noch ein Elementarteilchen ausgeschleudert wird, das man N e u t r i n o genannt hat und das keine Ladung und eine mindestens so kleine Masse wie das Elektron besitzen soll.

17. Allgemeiner Überblick

Der große Fortschritt, den wir in der Erkenntnis der Strahlen im allgemeinsten Sinne erreicht haben, ist im wesentlichen dadurch zustande gekommen, daß es der experimentellen Physik gelungen ist, die Erscheinungen in die einzelnen atomaren Prozesse aufzulösen und diese messend zu verfolgen. Dadurch ist dem Physiker ein Erfahrungsmaterial zugänglich geworden, welches weit hinausreicht über das, was sich im täglichen Leben bei oberflächlicher Beobachtung der Natur kund tut. Es ist deshalb kaum verwunderlich, daß wir nun von dieser Basis aus Gesetzmäßigkeiten als fundamental erkennen, die uns ganz merkwürdig anmuten müssen und gegen deren Anerkennung wir uns trotzdem nicht sträuben dürfen, wenn es uns um eine vollständige Beschreibung aller Naturerscheinungen zu tun ist. In diesem Sinne spricht man manchmal davon, daß jeder Fortschritt mit einem neuen Verzicht auf Anschaulichkeit verbunden ist. Tatsächlich ist indessen diese Auffassung kaum begründet, denn unter dem, was man anschaulich nennt, versteht man durchweg das, was man nach der groben Erfahrung des täglichen Lebens erwartet. Es ist nicht einzusehen, warum ein Physiker, der durch seine Versuche mehr über die Natur erfahren hat, diese Erfahrung nicht mehr als anschaulich bezeichnen dürfte und empfinden könnte. Wir möchten der Meinung Ausdruck geben, daß die Frage nach der Anschaulichkeit nur eine Frage der Gewöhnung ist und daß manches, was heute vielen unanschaulich vorkommt, von einem kommenden Geschlecht bald als höchst anschaulich und selbstverständlich angesehen werden wird.

Diese allgemeinen Betrachtungen werden illustriert durch den Dualismus, den wir zunächst nach unseren alltäglichen Erfahrungen zwischen Wellenstrahlung und Teilchenstrahlung erwarten müßten und den wir, wie im vorhergehenden gezeigt wurde, unter dem Zwange der experimentellen Ergebnisse vollständig haben aufgeben müssen. Licht zeigte sich zwar als eine Wellenstrahlung mit der für Wellen charakteristischen Eigenschaft, daß zwei Strahlen sich gegenseitig auslöschen können, aber gleichzeitig mußten wir es für seine Wirkung im Einzelprozeß aus endlichen, unteilbaren Energiequanten zusammensetzen. Materiestrahlen verhielten sich zwar in vielen Fällen genau so, wie wir das nach der gewöhnlichen Erfahrung erwarten sollten, als Schauer vom Einzelteilchen, gleichzeitig aber zeigten andere Versuche, daß zwei Materiestrahlen sich wie Lichtstrahlen gegenseitig auslöschen können.

Die durch diese Gegenüberstellung gekennzeichnete Vereinheitlichung kann indessen, wie die neuesten Erfahrungen zeigen, wahrscheinlich noch wesentlich weiter geführt werden. Trotz der Lichtquanten einerseits und der Wellennatur der Materiestrahlen andererseits klafft dennoch unserem Empfinden nach eine Lücke zwischen der elektromagnetischen Strahlung und der Materie. Die Physik ist im Begriff, auch diese aufzufüllen, denn wie wir sahen, liegen Beobachtungen

vor über die Materialisierung der Strahlung und die Zerstrahlung der Materie. Ein γ-Lichtquant kann sich in der Nähe eines Atomkerns zu einem Positron und einem Elektron materialisieren; treffen diese zwei Teilchen zusammen, dann verschwinden sie, und an ihrer Stelle entstehen zwei neue γ-Lichtquanten. Von dieser Erfahrung ausgehend hat die große Zahl der in letzter Zeit eingeführten Elementarteilchen nichts Beunruhigendes mehr, denn wir sehen, wie das eine in das andere verwandelt werden kann. Materie und Strahlung sind offenbar nur verschiedene Erscheinungsformen ein und derselben Sache, die Energie bildet das Bindeglied. Es ist das schönste Ergebnis der modernen Forschung, daß sie uns diesen letzten Ausblick auf eine allumfassende Einheitlichkeit der Natur gestattet.

Die Strahlen im Dienste der Heilkunde

Von Professor Dr. med. et phil. H. Wintz

I. Die Röntgenstrahlen

Die Anwendung der Röntgenstrahlen in der Medizin findet auf zwei an sich grundverschiedenen Gebieten statt: in der Diagnostik und in der Therapie. Das Ziel beider Anwendungsmöglichkeiten ist verschieden; also gehen nicht nur die technischen Maßnahmen in anderer Weise vor sich, auch die Qualität und die Quantität der Strahlen muß eine andere sein.

Schon bald nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen hat die Medizin sich die neuen Strahlen nutzbar gemacht. Aufnahmen der Hand oder menschlicher Knochen hat bereits Röntgen selbst gemacht. Wenige Jahre später wurde die biologische Wirkung der Röntgenstrahlen entdeckt: die von Strahlen getroffene Haut wurde verändert, es traten Verbrennungen auf, Haare fielen aus. Diese Vorgänge als therapeutische Maßnahmen nachzuahmen war naheliegend; man lernte, daß man mit Röntgenstrahlen Zellen des Körpers zerstören konnte.

Im ersten Jahrzehnt der Anwendung der Röntgenstrahlen waren die Apparate für Röntgenphotographie und Röntgentherapie die gleichen; später konstruierte die Technik für beide Anwendungsmöglichkeiten verschiedene Apparate, die bis zur Jetztzeit eine geradezu vollendete Durchbildung erfahren haben.

Welches sind nun die prinzipiellen Unterschiede für die Anwendung der Strahlen in der Röntgendiagnostik und der Röntgentherapie?

Die von der Röntgenröhre ausgesandte Strahlung ist inhomogen; das Strahlenbündel ist aus Strahlen verschiedener Wellenlänge zusammengesetzt. Es gleicht also im Prinzip dem weißen Licht, das bekanntlich sämtliche Regenbogenfarben enthält (s. S. 4). Röntgenstrahlen kurzer Wellenlänge nennt man harte Strahlen, die langwelligen sind die weichen Strahlen.

Röntgenphotographien sind Schattenbilder; ihre Herstellung ist möglich, weil die verschiedenen Gewebsgruppen des menschlichen Körpers eine verschiedene Durchlässigkeit für die Strahlen haben; der Knochen absorbiert (verschluckt) mehr an Strahlen als die ihn umgebenden Weichteile. Auf der belichteten Platte wird also im Schattenbereich des Knochens eine helle Partie auftreten. Nun kommt es aber darauf an, daß die Röntgenbilder gut „durchgezeichnet" sind,

das heißt, daß man möglichst viele Feinheiten erkennen kann. Würden die Röntgenstrahlen homogen sein, also nur eine einzige „Farbe“ enthalten, dann wäre die Durchzeichnung des Röntgenbildes lediglich von der Absorption der Strahlen abhängig. Es ist ein Vorteil, daß die Röntgenstrahlen inhomogen sind. Die weniger durchdringungsfähigen Strahlen bleiben in den Weichteilen, die an sich wenig absorbieren, hängen; die durchdringungsfähigeren durchsetzen selbst die Knochen, und dadurch ergibt sich auch eine Darstellung der Knochenstruktur und der Markhöhle.

Es besteht also für die Ausführung einer guten Röntgendiagnostik geradezu die Forderung nach einem möglichst inhomogenen Röntgenlicht.

Anders dagegen liegen die Verhältnisse bei der Therapie. Angenommen es soll eine Krebsgeschwulst, die in 10 cm Körpertiefe liegt, von Röntgenstrahlen getroffen und die Krebszellen zerstört werden. Dann besteht die Aufgabe, die Röntgenstrahlen — wie später auseinandergesetzt werden wird, in einer bestimmten Dosis — an den Ort der Geschwulst zu bringen. Das gesunde Körpergebiet, das über der Geschwulst liegt, muß dabei durchstrahlt werden. Es wird also in dieser Überschicht eine mehr oder weniger große Röntgenstrahlenmenge hängen bleiben. Da aber nun die Röntgenstrahlen — in Abhängigkeit von der Dosis — jede Zelle des menschlichen Körpers zu zerstören vermögen, so wird zweifellos die in der Aufschicht absorbierte Strahlenmenge einen gewissen Schaden anrichten. Aufgabe einer speziellen medizinischen Bestrahlungstechnik ist es, diesen Schaden möglichst klein zu gestalten. Dies ist aber um so leichter, je weniger „weiche“ Strahlenanteile das Röntgenlicht hat. Wir brauchen also für die Therapie möglichst durchdringungsfähige Strahlen. Das Röntgenstrahlenbündel muß auch weitgehend homogen sein; denn zur Zerstörung einer Krebsgeschwulst braucht man nicht nur eine bestimmte Strahlenmenge, sie muß auch in allen Schichten der Geschwulst gleichmäßig verteilt sein. Je inhomogener das Röntgenlicht, desto verschiedener ist die Belegung der einzelnen Schichten der Geschwulst. Das muß aber zu unnötiger und schädigender Überdosierung der röhrennahen Gewebsschicht führen.

Daher ist es nur eine zwangsläufige Entwicklung, wenn man heute für beide Anwendungsarten der Röntgenstrahlen in der Medizin Spezialapparate benützt.

1. Die Apparatur zur Erzeugung von Röntgenstrahlen

Röntgenstrahlen entstehen, wenn Kathodenstrahlen auf einen festen Körper auftreffen und abgebremst werden. Es findet eine Energieumsetzung statt; zum größeren Teil in Wärme, zum kleineren Teil in Röntgenstrahlen. Diese 1895 von Röntgen entdeckten Strahlen sind sehr kurzwellige elektromagnetische Schwingungen; wie die sichtbaren Lichtstrahlen zeigen sie Beugung, Interferenz, diffuse Zerstreuung, Brechung, Reflexion und Polarisationsfähigkeit. Ihre Wellenlängen sind sehr klein, sie sind von der Größenordnung zwischen $^1/_{100}$ und $^1/_{1000}$ von $^1/_{1000000}$ Millimeter.

Die Röntgenstrahlen werden in der Röntgenröhre erzeugt. Man unterscheidet die letzte Form, wie sie bereits Röntgen benutzt hat, die Ionenröhre, von der jetzt allgemein üblichen Elektronenröhre.

Die Ionenröhre besteht aus einem Glaskolben, ausgepumpt auf etwa ein tausendstel Millimeter Quecksilberdruck, mit Ansätzen zur Einführung des positiven Pols der Anode, dem negativen Pol der Kathode und einem weiteren Ansatz, der die Antikathode trägt. Diese ist ein zwischen Anode und Kathode hineingestelltes Platinblech, bei bestimmten Röhren mit einer Wasserkühlung versehen. Antikathode und Anode sind leitend verbunden. Legt man eine hochgespannte Gleichspannung an Anode und Kathode, so treten aus der Kathode die Kathodenstrahlen aus und treffen auf die Antikathode, wo sie gebremst werden. Im Brennpunkt entstehen dann die Röntgenstrahlen. Die Bezeichnung Brennpunkt hat insofern ihre Berechtigung, weil die Kathode hohlspiegelförmig gebildet ist, damit sie die Kathodenstrahlen auf eine möglichst kleine Fläche konzentriert.

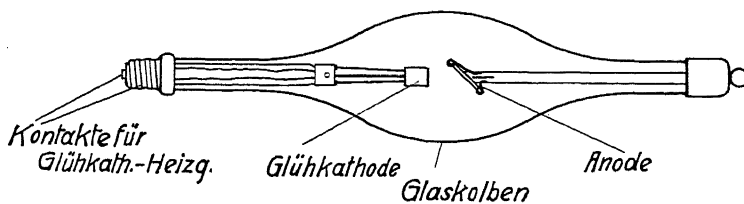



Abb. 1. Röntgenröhre (Coolidge-Röhre)

Ein minimaler Gasgehalt der Röhre ist notwendig, damit der Strom von der Kathode zur Anode übergehen kann. Durch die feine Zerstäubung an der Kathode werden aber die Gasteilchen resorbiert, deshalb muß die Ionenröhre eine Vorrichtung zur Regeneration, zum Einlassen kleinster Gasmengen haben. Durch geeignete Regeneriervorrichtungen, die auch automatisch bedient wurden, gelang es, mit solchen Ionenröhren eine gewisse Konstanz des Betriebes zu erzielen.

Die Elektronenröhren gehen in ihrem Prinzip auf die Entdeckung von Wehnelt zurück, nach der aus glühenden Metalloxyden Elektronen austreten können. Infolgedessen ist die moderne Elektronenröhre nach Coolidge mit einer Glühkathode aus enggedrehtem Wolframdraht ausgestattet, umgeben von einem kleinen Metallzylinder, um durch Beeinflussung der Kraftlinien den Verlauf der Kathodenstrahlen nach der Antikathode zu lenken. Diese ist als dicker Wolframklotz ausgebildet, der durch das Bombardement der Kathodenstrahlen nahezu weißglühend wird, seine Wärme also durch Strahlung abgibt.

Im Gegensatz zur Ionenröhre enthält die Glühkathodenröhre keine Gasatome, die nur den Vorgang der Elektronenerzeugung stören würden.

Diese Röntgenröhre hat somit ein wesentlich einfacheres Aussehen als die

Ionenröhre. Sie hat lediglich die zwei Zuführungen der Anode und der Kathode, denn die Anode ist gleichzeitig als Antikathode ausgebildet (s. Abb. 1).

Zum Betrieb der Röntgenröhre wird ein hochgespannter gleichgerichteter Elektronenstrom von der Kathode zur Anode durchgeschickt. Die Spannung beträgt zur Erzeugung der Diagnostikstrahlen etwa 50000 bis 120000 Volt, für Therapiestrahlen mindestens 200000 Volt. Die so entstehenden Kathodenstrahlen treffen mit der ungeheuren Geschwindigkeit von 265000 km pro Sekunde auf die Anode auf. Die erforderlichen hohen Spannungen werden mit Hilfe von Transformatoren erzeugt. Zu der nun folgenden Beschreibung des für die Röntgenapparatur zweckmäßigen Transformators müssen zunächst die physikalischen Grundlagen kurz gestreift werden.

Abb. 2. Magnetfeld eines stromdurchflossenen Drahtes durch Eisenfeilspäne sichtbar gemacht

Von den vielerlei Wirkungen des elektrischen Stromes ist eine immer vorhanden, nämlich das magnetische Feld, das ihn umgibt (Abb. 2). Wird der Strom ausgeschaltet, so verschwindet das Magnetfeld und mit ihm die magnetischen Kräfte. Legt man mehrere solcher stromdurchflossener Drähte zusammen, etwa indem man einen Draht zu einer Spule aufwindet, so ändert sich das Bild der Kraftlinien entsprechend der neuen Anordnung etwas. Es bildet sich ein resultierendes Feld von der Form der Abbildung 3.

Wenn nun in die Nähe des stromdurchflossenen Leiters ein anderer in sich geschlossener Leiter gebracht wird, der aber keinen Anschluß an die Stromquelle hat, so müssen die Kraftlinien diesen zweiten Leiter schneiden. Es entstehen im nichtstromdurchflossenen Leiter Stromstöße, bedingt durch das Schneiden der Kraftlinien. Diese Tatsache, die wir Induktion nennen, ist zuerst von Michael Faraday entdeckt worden. Sie bildet die Grundlage aller unserer heutigen Maschinen zur Erzeugung und Umformung elektrischer Ströme. Auch dem Hochspannungstransformator der Röntgentechnik liegt das Induktionsprinzip zugrunde.

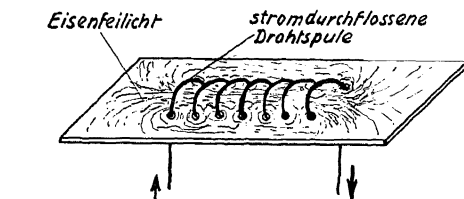



Abb. 3. Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule durch Eisenfeilspäne sichtbar gemacht

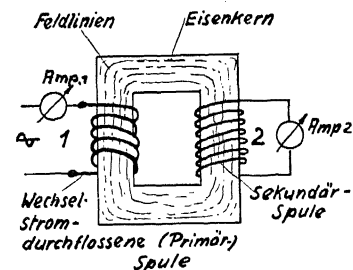



Abb. 4. Schematischer Aufbau eines Transformators

Magnetische Kraftlinien entstehen um jeden stromdurchflossenen Leiter, aber auch um einen Magneteisenstab. Daher verbindet die Technik die beiden Möglichkeiten. Ein Weicheisenstab wird zum Magnet, wenn er im Kraftfeld eines stromdurchflossenen Leiters liegt. Da seine magnetische Kraft mit dem Verschwinden des magnetischen Kraftfeldes erlischt, so induzieren auch seine Kraftlinien die Drahtwindungen der ihn umgebenden Spule.

Im Transformator ist das Problem in der auf Abbildung 4 dargestellten Weise gelöst.

Wir haben zunächst einen vollständig geschlossenen Weicheisenkern, dessen einer Schenkel von der wechselstromdurchflossenen Spule umgeben ist. Der Eisenkern hält in der auf dem Bilde angedeuteten Weise die magnetischen Kraftlinien zusammen, so daß alle von der Primärspule 1 und ihrem Wechselstrom erzeugten magnetischen Kraftlinien auch die auf dem anderen Schenkel sitzende Sekundärspule 2 durchsetzen. Bei guter Durchbildung des magnetischen Kraftfeldes kann man der Spule 2 bis auf wenige Prozent die gleiche elektrische Leistung (z. B. in Watt = Volt × Ampere) entnehmen, die in die Spule 1 hineingeschickt wurde; es paßt sich sogar die Stromaufnahme der Spule 1 automatisch der Entnahme aus der Spule 2 an. Entnimmt man der Spule 2 eine große Leistung, so steigt auch die Leistungsaufnahme in Spule 1, es fließt ein großer Strom. Die gleiche Leistung kann man nun, da die elektrische Leistung durch das Produkt aus Stromstärke und Spannung gegeben ist, auf verschiedene Weise erzeugen z. B. mit großem Strom bei kleiner Spannung oder mit kleinem Strom bei großer Spannung. Nun kann man bei dem Transformator das Verhältnis der beiden Spulenspannungen sehr einfach durch das Verhältnis ihrer Windungszahlen beeinflussen. Wählt man für die Spule 1 wenige Windungen eines dicken Drahtes und für die Spule 2 viele Windungen eines dünneren Drahtes, so erhält man in der dickeren Spule einen großen Strom von der Spannung der Wechselstromquelle (z. B. 220 Volt). In der Spule 2 entsteht dann eine im Verhältnis der Windungszahlen größere Spannung mit in demselben Verhältnis kleinerem Strom. Wenn in den Primärspulen unserer Röntgentransformatoren Ströme von einigen Ampere bei 220 Volt Spannung fließen, so haben wir bei einem Übersetzungsverhältnis (Verhältnis der Windungszahlen) von 1 : 1000 in der Sekundärspule eine 1000mal so große Spannung also 220000 Volt, aber nur $^{1}/_{1000}$ der Stromstärke der Primärspulen, also einige Milliampere.

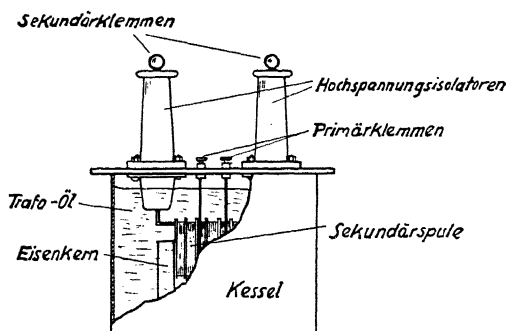



Abb. 5. Röntgentransformator, Schnitt

Abbildung 5 stellt einen Röntgentransformator im Schnitt dar. Wir erkennen den Eisenkern und die Sekundärspule, deren Enden mit Hilfe von Hochspannungsisolatoren aus Porzellan durch den Deckel des Transformatorkessels nach außen geführt sind. Die Sekundärspule ist in einzelne Schichten unterteilt, weil zwischen den einzelnen Teilen der Spule bereits beträchtliche Spannungen auftreten, die durch isolierende Zwischenschichten unschädlich gemacht werden müssen. Der ganze Transformatorkessel ist zur besseren Isolation mit dem hochisolierenden Transformatoröl gefüllt, so daß die Spulen vollständig in Öl getaucht sind. Die Primärwicklung ist im Öl in hinreichender Entfernung von der Sekundärwicklung mit ihren Enden zu den auf dem Deckel des Transformatorkessels sichtbaren Primärklemmen geführt.

Die von dem Röntgentransformator gelieferte Hochspannung ist natürlich, genau wie die Primärspannung, eine Wechselspannung. Die Röntgenröhren müssen aber mit konstanter oder pulsierender Gleichspannung betrieben werden. Dazu ist eine Gleichrichtung des hochgespannten Wechselstromes erforderlich. Hierzu dienen die sogenannten Glühventile. Diese sind im Prinzip aufgebaut wie eine Röntgenröhre, d. h. sie bestehen aus einem Hochvakuumkolben, in den eine Glühkathode und eine Anode eingeschmolzen sind. Nur ist die Anode hier nicht als Röntgenstrahlenquelle ausgebaut. Die Glühventile lassen den Strom nur in der Richtung von der Kathode zur Anode durchtreten. Schaltet man ein solches Ventil in einen Wechselstromkreis, so kann der Strom nur dann durchtreten, wenn der an der Glühkathode des Ventiles liegende Transformatorpol gerade negativ ist. Die andere Halbperiode wird unterdrückt.

Dies bedeutet natürlich einen Verlust. Man hat deshalb verschiedene Schaltungen zur vollen Aus-

nutzung beider Halbperioden entwickelt. Hier sollen zwei schematisierte Beispiele solcher Schaltungen betrachtet werden. Das 1. Beispiel ist die sogenannte Graetz-Schaltung (Abb. 6). Für diese Schaltung sind 4 Ventile erforderlich. Das Vorzeichen der beiden Transformatorpole wechselt in der Sekunde 50mal zwischen Plus und Minus. Angenommen, es sei im Augenblick gerade der linke Transformatorpol negativ; dann kann der Strom das vordere Ventil passieren und durch die vordere Ableitungsstange über die Kathode der Röntgenröhre zur Anode und von da durch das Ventil rechts an der mit + bezeichneten Ableitstange zum anderen Pol des Transformators gelangen. Wenn der rechte Transformatorpol negativ ist, geht der Strom über das rechte vordere Ventil ebenfalls wieder zur Kathode der Röntgenröhre und über das linke hintere Ventil wieder zurück zum anderen Transformatorpol. In beiden Halbperioden passiert der Strom die Röntgenröhre also in der gleichen Richtung. Die auf diese Weise an der Röhre liegende Spannung ist zwar pulsierend, aber es werden beide Halbperioden ausgenutzt. Diese Vierventilschaltung findet besonders in der Röntgendiagnostik Anwendung.

Abb. 6. Halbschematische Darstellung der Graetz-Schaltung

Als 2. Beispiel ist eine in der Röntgentherapie viel benutzte Schaltung für konstante Gleichspannung dargestellt, die sogenannte Stabilivoltschaltung (Abb. 7). Der eine Pol des Transformators liegt in der Mitte zwischen zwei hintereinander geschalteten Kondensatoren. Der andere Pol ist mit 2 Ventilen verbunden. Die Ventile führen zu je einem der Kondensatoren. Es ist nun so eingerichtet, daß in der einen Halbperiode, wenn z. B. der untere Transformatorpol negativ ist, durch eines der Ventile der eine der beiden Kondensatoren, in diesem Fall der linke, auf die volle Transformatorspannung, etwa 100000 Volt negativ aufgeladen wird; während der anderen Hälfte der Periode ist der untere Transformatorpol positiv. Es kann nun auf den linken Kondensator keine Ladung mehr fließen. Dagegen wird nunmehr der rechte Kondensator über das rechte Ventil auf die entgegengesetzte volle Spannung aufgeladen. Da die beiden Kondensatoren hintereinander geschaltet sind, herrscht also nunmehr zwischen ihren beiden äußeren Polen eine Spannung, die gleich der doppelten des Transformators ist. Diese Spannung legt man direkt an die Röntgenröhre. Wenn die Kondensatoren groß genug sind, so erhält man auf diese Weise eine konstante Gleichspannung, deren Wert gleich der doppelten Scheitelspannung des Hochspannungstransformators ist.

Abb. 7. Schaltschema der Stabilivoltschaltung

In dieser Weise hat man eine ganze Reihe von Schaltungen für pulsierende und konstante Spannung entwickelt, mit Spannungsverdoppelung, sogar mit Spannungsverdreifachung.

Nach Erläuterung der Schaltschemata soll nun der äußere Aufbau der Röntgenapparatur gezeigt werden. Dieser erfordert außer den prinzipiellen Teilen, wie Röntgenröhren, Hochspannungstransformatoren und Ventilen mit zugehöriger Schaltung noch

1. Einrichtungen zum Hochspannungs- und Strahlenschutz,
2. Schaltorgane zur Regelung der elektrischen Bedingungen und Instrumente zur Kontrolle derselben,
3. Halte- und Einstellvorrichtungen für die Röntgenröhre, Durchleuchtungs- bzw. Bestrahlungsgeräte.

Die Abb. 8 (Tf. 1) zeigt eine Röntgenanlage der Siemens-Reiniger-Werke zur Röntgendurchleuchtung, wie sie heute viel im Gebrauch ist. Wir sehen ganz links den schwarzen Transformatorkessel, aus dem die beiden Sekundärpole nach oben abgeleitet sind. Die Ableitungen sind als Hochspannungskabel ausgebildet, deren äußere Hülle geerdet ist. Sie verbinden die Sekundärseite des Transformators mit den Polen der Röntgenröhre, die ihrerseits mit einer geerdeten Metallhülle umgeben ist und im Bild als weißer Zylinder hinter dem vertikal stehenden Durchleuchtungsgerät erkennbar ist. Somit ist ein vollständiger Hochspannungsschutz vorhanden; denn der allseitige metallische Einschluß der Hochspannung führenden Teile verhindert ein Durchgreifen elektrischer Feldlinien in den Außenraum. Der Behälter der Röntgenröhre ist außerdem mit einer Bleischutzhülle versehen, so daß jeder ungewollte Röntgenstrahlenaustritt unmöglich gemacht ist. Der Röhrenbehälter sitzt an dem Durchleuchtungsgerät, das für die Röntgendurchleuchtung einen rechts sichtbaren Leuchtschirm trägt. Der Leuchtschirm ist durch eine Röntgenstrahlen absorbierende, aber sichtbares Licht durchlassende Bleiglasscheibe abgedeckt, so daß der Beobachter des Leuchtschirmes gegen Röntgenstrahlen geschützt ist. Der Bleigummischurz unterhalb des Leuchtschirmes dient ebenfalls dem Strahlenschutz. Rechts neben dem Durchleuchtungsgerät steht der Schalttisch, der die Regelorgane und die Kontrollmeßinstrumente aufnimmt.

Die Abb. 9 (Tf. 1) bringt ein Beispiel für eine Therapieanlage. Ganz links befindet sich der Schalttisch mit den Regelorganen und den Kontrollmeßinstrumenten. Er ist gegen gestreute Röntgenstrahlen durch eine Bleiwand geschützt. Die Röntgenröhre sitzt in der horizontalen Schutzhaube, die auch wieder durch einen Bleimantel ungewollten Röntgenstrahlenaustritt verhindert und geerdet ist, also die Hochspannung vollkommen sicher abschließt. Der Hochspannungstransformator für die Röhre befindet sich, ebenfalls allseitig abgeschlossen, in dem an der Wand sichtbaren geerdeten Metallschrank. Die Verbindung von Hochspannung und Röntgenröhre ist durch Hochspannungskabel bewerkstelligt. Der Röhrenbehälter ruht in einem Stativ (Wintz-Kanone), das eine allseitige

Verstellung der Röhre ermöglicht und so erlaubt, den Strahlenkegel in jeder Richtung einzustellen. Der Tisch, auf den der Patient zu liegen kommt, ist durch eine Pumpe in der Höhe verstellbar, seine Platte ist allseitig beweglich.

2. Die Röntgendiagnostik

Die Verwendung der Röntgenstrahlen als diagnostisches Hilfsmittel geschieht in zweierlei Weise: einmal dadurch, daß man auf der photographischen Platte (jetzt allgemein Film) das Schattenbild aufnimmt; zum anderen mit dem Durchleuchtungsverfahren, bei dem man auf einen „Leuchtschirm" das Schattenbild des menschlichen Körpers, der sich zwischen der Röhre und dem Leuchtschirm befindet, beobachtet. Die Helligkeit des Schirmbildes ist beschränkt, weil es durch die Fluoreszenz der auf einem Karton aufgetragenen Leuchtmasse zustande kommt. Barium-Platin-Cyanür verwendete bereits Röntgen. Der modernen Technik gelang es inzwischen, durch weitere Verbesserung die Helligkeit der Schirme zu vervielfachen. Trotzdem kann man im Durchleuchtungsbild — dessen Betrachtungszeit nicht beliebig ausgedehnt werden darf, längst nicht die Feinheiten erkennen, wie sie der Röntgenfilm bei guter Beleuchtung ergibt.

An eine gute Röntgenphotographie muß man, gleichgültig welcher Körperteil darauf abgebildet wird, die Forderung stellen, daß sie möglichst viele Feinheiten zeigt, und daß sie in ihren Einzelheiten scharf dargestellt ist.

Es sei nun kurz die Voraussetzung für die Erzielung einer solchen Röntgenaufnahme dargestellt.

Die Röntgenbilder sind, wie schon erwähnt Schattenbilder. Ihre Schärfe hängt nun zunächst davon ab, daß der Entstehungsort der Röntgenstrahlen auf der Antikathode, der Brennfleck, möglichst klein ist. Ein punktförmiger Brennfleck wäre aber unzweckmäßig, da die Antikathode an dieser Stelle durch das Bombardement der Kathodenstrahlen allzu stark erhitzt würde. Die Technik macht infolgedessen die Konzession eines etwas größeren Brennfleckes, oder es wird der sinnreiche Ausweg gewählt, die Antikathodenplatte rasch rotieren zu lassen, damit in der kurzen Zeit des Betriebs der Röntgenröhre die Auftreffstelle der Kathodenstrahlen gewechselt wird. Mit solchen Röntgenröhren, die bereits Anspruch auf technische Vollendung machen können, sind Röntgenaufnahmen mit feinen Details leicht möglich.

Daß man eine möglichst inhomogene Strahlung, die einen größeren Anteil weicher Strahlen besitzt, zur Aufnahme wählt, wurde bereits begründet. Es ist weiterhin verständlich, daß man für die Aufnahmen verschiedener Körperstellen auch die Zusammensetzung des Röntgenlichts ändern muß. Das geschieht durch Erhöhung oder Verminderung der primären Spannung, je beschleunigter die Kathodenstrahlen, desto durchdringungsfähiger die Röntgenstrahlen.

Bisher wurde nur erwähnt, daß Röntgenstrahlen in den verschiedenen Schichten absorbiert werden. Ihre Energie wird zum Teil in Wärme umgesetzt; es treten auch chemische Reaktionen an der Stelle der Einwirkung auf.

Ein Teil der Strahlen wird zerstreut. Ein Vorgang, der sowohl für die photographische Aufnahme als auch für die therapeutische Anwendung von großer Bedeutung ist. Diese Erscheinung ist etwa so zu verstehen, daß die auf einzelne Atome auftreffenden Primärstrahlen aus ihrer Richtung abgelenkt werden.

Durch die Streuung entsteht im durchstrahlten Gebiete eine nach allen möglichen Seiten gehende „Streustrahlung". Durch sie wird zweifellos die Schärfe des Röntgenbildes beeinflußt und zwar in um so größerem Maße je dicker die durchstrahlte Körperpartie ist.

Abb. 10. Prinzipschema der Potter-Bucky-Blende

Die Streustrahlung ist auch nicht gleichmäßig, sie hängt von der Dichte des durchstrahlten Körpers ab; dazu kommt, daß härtere Strahlung stärker gestreut wird als weiche. Dies macht sich besonders unangenehm bemerkbar, wenn eine dickere Körperpartie, etwa ein voluminöser Oberschenkel oder das Becken, photographiert werden soll. Dazu braucht man eine härtere Strahlung; sie wird an sich stärker gestreut, die Dicke des Objekts gibt dazu besondere Möglichkeit.

Maßnahmen gegen die Streustrahlung waren für weitere Fortschritte in der Röntgenphotographie unerläßlich. Man engte also zunächst durch „Blenden" den Strahlenkegel auf die notwendigste Größe ein, damit eine möglichst kleine Körperpartie durchstrahlt werde; man schaltete die Luftstreustrahlung aus, indem man röhrenförmige Tubusse vor den Röhren anbrachte. Am wirkungsvollsten hat sich die Gitterblende, jetzt allgemein Potter-Bucky Blende (Abb. 10) genannt, erwiesen. Legt man zwischen den durchstrahlten Körper und den photographischen Film ein aus schmalen Bleistreifen hergestelltes Gitter (Raster), so werden die Aufnahmen schärfer. Die Richtung der einzelnen Lamellen ist leicht schräg im Sinne der Einfallsrichtung der Primärstrahlen. Die aus einem anderen Winkel kommenden Streustrahlen werden in diesen Bleilamellen absorbiert. Um die Abbildung des Bleirasters zu vermeiden, wird dieser während der Aufnahme gleichmäßig vor dem Film auf mechanischem Wege vorbei bewegt.

Die divergent verlaufenden Röntgenstrahlen machen das Schattenbild größer als das Original; daher wählt man einen großen Röhrenabstand, weil dadurch der Strahleneinfall der Parallele angenähert wird. Diese Aufnahme aus großer Entfernung macht eine große Strahlenausbeute notwendig,

weil anders die Belichtungszeit unerträglich lang sein müßte. Abgesehen davon, daß für sich bewegende Organe kurzzeitige Momentaufnahmen die Idealforderung darstellen, ist es bei kranken Menschen überhaupt erwünscht, mit einer möglichst kurzen Aufnahmezeit auszukommen. Daher sind die modernen Röntgenapparate für Diagnostik ebenfalls sehr leistungsfähig. Sie erlauben die Anwendung von 100–150 mA Sekundärstromstärke bei einer sekundären Spannung von 60–150 kV.

Eine gute Photographie muß kontrastreich sein; vom Röntgenbild ist diese Eigenschaft in besonders hohem Maße zu fordern. In der Bromsilberschicht des Films werden nur wenige Prozent der auftreffenden Röntgenstrahlen absorbiert, der größte Teil der Strahlen durchsetzt die Schicht, geht also für die Aufnahme ungenützt verloren. Zur besseren Ausnützung hat man daher die Schicht dicker als die gewöhnliche photographische Platte gemacht; der dünne Film konnte auch auf beiden Seiten mit einer Schicht versehen werden.

Man kann die Einwirkung auf die Bromsilberschicht durch ein Spezialverfahren erhöhen, und dadurch die Belichtungszeit wesentlich herabsetzen: durch die Verstärkungsfolie. Diese besteht aus einem dicken Karton, begossen mit einer Emulsion von Kalzium-Wolframat. Die in der Verstärkungsfolie aufgenommene Strahlenenergie wird in Fluoreszenzlicht transformiert, gibt also an den Negativfilm Lichtstrahlung ab und bewirkt somit zusätzliche Belichtung. Auch die Verstärkungsschicht wird doppelseitig angewendet, so daß der Film zwischen zwei Folien eingelegt wird. Je feinkörniger die Verstärkungsfolie ist, desto brauchbarer ist sie. Daß auch der Entwicklungsprozeß der Belichtung des Negativbildes angepaßt werden muß, sei nur nebenbei erwähnt.

Was nun die Röntgenaufnahmen bei den einzelnen Erkrankungen selbst anbelangt, so kann man zwei Gruppen unterscheiden.

1. Die Aufnahmen der schattengebenden Organe und Knochenteile.

2. Die Aufnahmen mit Hilfe von Kontrastmitteln, um die Konturen nichtschattengebender Organe darzustellen.

Wohl die meisten Knochenaufnahmen werden in der Unfallschirurgie vorgenommen, um auf einfache und schonende Weise festzustellen, welche Verletzungen der Knochen erlitten hat. Dann wird die Röntgenaufnahme zur Kontrolle der Behandlungsmaßnahmen herangezogen; wird eine Aufnahme gemacht, wenn ein Knochenbruch durch den Verband fixiert ist, so sieht man, ob die exakte Zusammenfügung der Bruchstelle gelungen ist. Des weiteren wird die Röntgenphotographie des Knochens zur Erkennung bestimmter Erkrankungen herangezogen. Es gibt Störungen im Kalkstoffwechsel, durch die eine Kalkarmut des Knochens herbeigeführt wird; auch Störungen in der Funktion der Drüsen mit innerer Sekretion führen zu eigenartigen Knochen- und Gelenksveränderungen. Oft ist die Röntgenaufnahme das einzig sichere diagnostische Hilfsmittel bei den undeutlichen und nicht exakt zu definierenden Schmerzen

der Patienten. Das gleiche gilt für eine eigenartige Knochenerkrankung, die Arthritis deformans.

Gerade die Tatsache, daß manche schwere Erkrankung ganz im Beginn durch die Röntgenphotographie erkannt werden kann, wie Knochengeschwülste oder die Knochenerweichung, bedeutet einen ungeheueren Vorteil für die Behandlung.

Die Röntgenphotographie ist bei Verletzungen des Schädels sehr wichtig. Naturgemäß müssen gerade diese Aufnahmen sehr kontrastreich und scharf ausgeführt werden, weil doch hier zahlreiche Knochenschatten sich überlagern. Die Deutung der Schädelaufnahmen wird wesentlich erleichtert durch die Methode der stereoskopischen Aufnahme.

Diese wird im Prinzip genau so aufgenommen wie die photographische Stereoskopie. Der Kopf des Patienten liegt auf einer Tunnelkassette; sie besteht aus einem dünnen Auflagebrett mit seitlichen Schlitzen, durch die die eigentliche Filmkassette eingeschoben wird. Zunächst wird die erste Kassette eingelegt und die Aufnahme gemacht. Der Patient bleibt nun ganz ruhig liegen, die Röntgenröhre wird in der Querrichtung um 7 cm verschoben, aus der Tunnelkassette die erste Filmkassette entfernt und die zweite eingelegt, dann erfolgt die zweite Aufnahme. Die so erhaltenen stereoskopischen Negative betrachtet man mit Hilfe eines Spiegelstereoskops oder eines Prismenstereoskops. Der plastische Eindruck einer guten stereoskopischen Schädelphotographie überrascht; man sieht zahlreiche Details, die vorher in dem Durcheinander der Linien nicht zu erkennen waren.

Einen besonderen Vorteil bringt die stereoskopische Aufnahme der Wirbelsäule mit sich. Wohl ist es möglich, die Wirbelsäule zweimal mit senkrecht aufeinander eingestellten Aufnahmen zu photographieren und so Veränderungen zu erkennen; aber die stereoskopische Photographie zeigt viel mehr; und mit ihr ist es auch möglich, frühzeitig Überpflanzungsgeschwülste, etwa bei Krebs, festzustellen.

Weil die Stereoskopie bei einfacher Betrachtung die räumlichen Verhältnisse zeigt, zieht man sie auch bei der Fremdkörperlokalisation heran. Ob beispielsweise ein Geschoß vor oder hinter einem Knochen liegt, ist bei der einfachen Aufnahme nicht ohne weiteres feststellbar. Die Stereoskopie zeigt dies auf den ersten Blick. Durch die Meßmethoden aber, die zum Ausmessen der stereoskopischen Bilder ausgearbeitet wurden, ergeben sich für die Entfernung von der Haut oder bestimmten Fixpunkten ganz genaue Zahlenwerte.

Deshalb wird die Röntgenstereoskopie mit sehr befriedigenden Resultaten auch bei der Feststellung der Größenverhältnisse des weiblichen Beckens herangezogen. Es ist wichtig vor einer Geburt zu wissen, ob ein Mißverhältnis zwischen dem Kopf des Kindes und dem Becken der Mutter vorliegt. Man kann zwar das weibliche Becken durch Messungen von außen und mit Hilfe entsprechender Geräte auch von innen messen und dementsprechend beurteilen, doch fehlt eine exakte Bestimmung von Größe und Form des kindlichen Kopfes.

Jetzt kann man die Messung mit Hilfe der stereoskopischen Röntgenaufnahme vornehmen. Die Aufnahme wird am besten in Seitenlage der Mutter gemacht. Um ein Vergleichsmaß zu haben, legt man die Enden eines Meßzirkels außen an den Dornfortsatz des letzten Lendenwirbels und nach vorn zu an den oberen Schambeinrand an. So kann man ohne weiteres den inneren Beckendurchmesser im stereoskopischen Bild ablesen, ebenso auch den Durchmesser des kindlichen Kopfes feststellen.

Die so ermittelten Kenntnisse sind oft für den weiteren Verlauf der Geburtsleitung von ausschlaggebender Bedeutung.

Nach der Knochendiagnostik ist wohl die Untersuchung der Brusteingeweide das Gebiet, in dem die Röntgenstrahlen große Dienste leisten. Man kann ruhig behaupten, daß eine exakte Lungendiagnostik erst durch die Röntgenstrahlen ermöglicht wurde. Wichtig ist vor allem die Frühdiagnose der Lungentuberkulose, deren einzelne Formen durch die Röntgenbilder klar erkannt werden. Auch für die Beurteilung der Lebensaussichten, der Prognose, sind die Röntgenbilder wichtig. Die Verfeinerung der Technik hat besondere Fortschritte mit sich gebracht. Auch die Abgrenzung verschiedener nichttuberkulöser Erkrankungen gegen die Lungentuberkulose ist möglich. Erwähnt sei nur der Lungenkrebs (Lungenkarzinom) oder die Erkennung von Filialgeschwülsten in anderen Organen liegender Krebse.

Besonders deutliche Bilder ergeben die Ausschwitzungen bei der Rippenfellentzündung.

Die Dichte des Herzens ließ schon frühzeitig, auch bei ziemlich primitiver Apparatur die Herzbewegungen und die Herzformen im Röntgenbild erkennen. Dank der großen Verbesserungen der Apparatur verfügen wir jetzt über eine hochwertige röntgenologische Herzdiagnostik. Freilich wird man sich bei der Herzuntersuchung niemals allein auf den Röntgenbefund verlassen. Es muß das Ergebnis der Auskultation (Abhören) und der Perkussion (Abklopfen) in erster Linie mit herangezogen werden. Der Röntgenbefund ergänzt und präzisiert dann die anderen Feststellungen.

Bei der Herzuntersuchung ist die Aufnahme ebenso von Bedeutung wie die Durchleuchtungsbeobachtung des arbeitenden Herzens. Für die Aufnahme selbst gilt es besondere Forderungen zu erfüllen. Um die Herzgrenzen scharf darzustellen, muß die Aufnahme sehr kurzzeitig sein; die wahre Herzgröße wird durch die Fernaufnahme ermittelt, die man meist aus einer Entfernung von 150 cm macht. Größenveränderungen der einzelnen Herzpartien können so zu Beginn der Erkrankung erkannt werden; fortlaufende Röntgenuntersuchungen erbringen den genauen Nachweis zunehmender Vergrößerungen. Daß die Herzform von Bedeutung ist, braucht nicht weiter auseinander gesetzt werden. Auch für die Beurteilung von Klappenfehlern dient als Ergänzung der Perkussion und der Auskultation die Gesamtröntgenuntersuchung. Ein guter Beobachter vermag

am Durchleuchtungsschirm den Ablauf der Herzbewegung zu erkennen, wenn auch einmal hierfür die Röntgenkinematographie noch viele wertvolle Aufschlüsse geben wird.

Gerade weil die Röntgenuntersuchung in wenigen Minuten einen gut verwertbaren Anhaltspunkt für den Zustand des Herzens ergibt, ist sie vor Operationen von größter Bedeutung, besonders in solchen Fällen, bei denen die Zeit für eine länger dauernde Beobachtung und genauere klinische Untersuchung fehlt.

Man kann heute bereits eine größere Anzahl typischer Herzformen im Röntgenbild unterscheiden, deren Vergleich auch dem weniger Geübten manch wichtigen Anhaltspunkt ergibt.

Abbildung 11 (Tf. 2) zeigt ein Herz, dessen linker Vorhof stark erweitert ist im Zusammenhang mit einer chronischen Nierenerkrankung, Abbildung 12 (Tf. 2) das außerordentlich erweiterte und vergrößerte Herz bei einer Herzmuskelerweiterung (myodegeneratio cordis).

Auch die röntgenologische Herzuntersuchung bei sportlichen Anstrengungen gewinnt immer größere Bedeutung.

Der Röntgenologe untersucht aber nicht allein das Herz selbst, sondern er achtet auch auf den Zustand der zu- und abführenden Gefäße. Als Beispiel sei lediglich auf die Veränderung der Aorta (Herzschlagader) hingewiesen, bei der es Erweiterungen (Aneurysma) gibt, die fast nur durch das Röntgenbild erkannt werden. Auch typische Verkalkungen der Aorta zeigt das Röntgenbild.

Die einzelnen Teile des Verdauungskanals arbeiten in Abhängigkeit voneinander, deshalb sollte man auch, wenn ein bestimmtes Organ, zum Beispiel der Magen oder Dickdarm als krank im Vordergrund steht, doch die Untersuchung des ganzen Verdauungstraktes durchführen. Bei diesen Untersuchungen ist auch die Aufnahme und die Durchleuchtung notwendig. Beide Maßnahmen müssen sich ergänzen. Es ist eher möglich, allein mit der Durchleuchtung auszukommen, als die Diagnose lediglich aus Röntgenaufnahmen zu stellen, es sei denn, daß eine ganz charakteristische und schwere Veränderung vorliegt, etwa ein fortgeschrittener Magenkrebs.

Die Untersuchung beginnt mit der Durchleuchtung. Der Patient steht vor dem Durchleuchtungsgerät und trinkt nun in kleinen Schlucken den Bariumbrei. Dabei beobachtet der Arzt den Durchgang durch die Speiseröhre. Während man früher im allgemeinen sehr große Quantitäten einnehmen ließ, kommt dies heute nur bei ganz speziellen Untersuchungen in Frage, denn die ausdehnende Füllung des Magens verdeckt kleine Einzelheiten. Es wird jetzt viel Wert darauf gelegt, die Schleimhautfalten und die Konturen der Schleimhaut darzustellen. Zunächst beobachtet man die Arbeit des Magens selbst, dessen Muskulatur sich rhythmisch zusammenzieht. Der Brei passiert den Pförtner des Magens und verschwindet dann im Zwölffingerdarm. Dieser Ablauf der Magenbewegung läßt bereits

mancherlei Schlüsse auf irgendwelche Störungen zu. Die Untersuchung wird wesentlich erleichtert, wenn man Durchleuchtungsstative besitzt, die eine Lageveränderung erlauben. Daher gibt es heute bereits Apparate, mit denen man den Patienten während der Durchleuchtung aus der senkrechten in die liegende Stellung bringen kann, ebenso in alle Zwischenpositionen. Auch die Möglichkeit der Schrägdurchleuchtung durch Drehung der Röntgenröhre und des Patienten ist vorgesehen.

Von einzelnen Positionen des Breidurchganges durch den Magen werden Röntgenaufnahmen gemacht, wozu man meist den Patienten am gleichen Stativ verbleiben läßt.

3. Die Röntgenphotographie mit Hilfe von Kontrastmitteln

Magen — Darmkanal

Der Verdauungskanal von der Speiseröhre bis zum Enddarm läßt sich durch die Röntgenphotographie nicht ohne weiteres darstellen, denn die Magen- und Darmwand absorbiert zu wenig Röntgenstrahlen, als daß ein Schatten auf dem Durchleuchtungsschirm oder dem Röntgenfilm entstehen könnte. Deshalb ist der Röntgenologe darauf angewiesen, diese Hohlorgane mit einer kontrastgebenden Masse zu füllen. Es ist verständlich, daß diese Kontrastmittel, die heute in vollendeter Form vorliegen, einerseits von einer hinreichenden Dichte, andererseits aber vollkommen ungefährlich sein müssen. Man verwendet dazu jetzt fast ausschließlich Bariumsulfat, während früher Wismutsalze (Bismutum subnitricum und Bismutum carbonicum) zur Anwendung kamen. Nur chemisch reines Barium sulfuricum ist brauchbar.

Für die Magen-Darmdurchleuchtung wird ein sämiger Brei hergestellt, wobei außer Wasser noch Zusätze notwendig sind, damit das Bariumsulfat nicht sedimentiert. Deshalb gebraucht man heute fast ausschließlich fertige Mittel, die als Citobarium, Eubarit oder Roebarit im Handel sind.

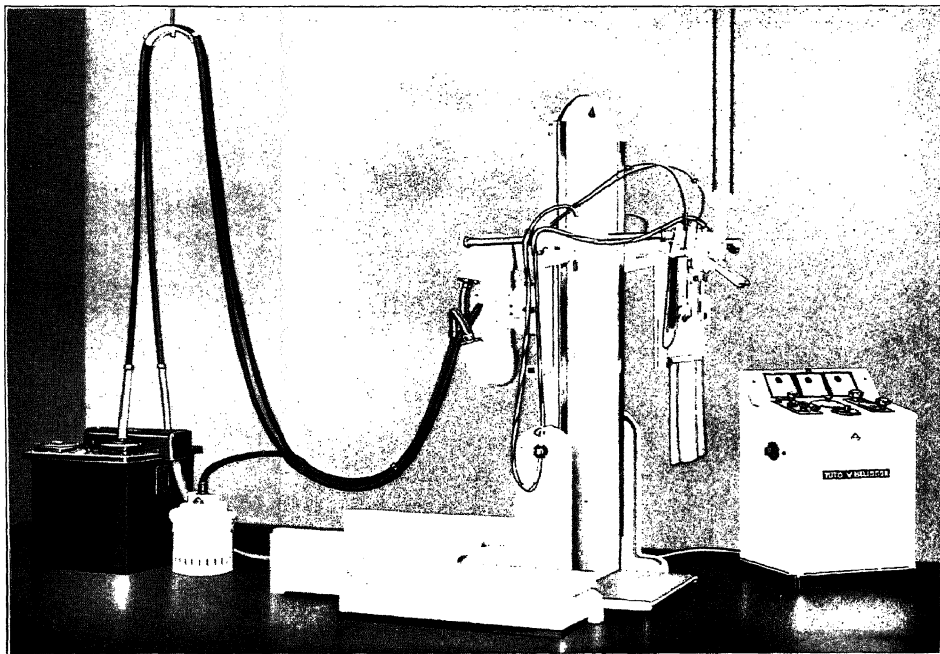
Der Patient muß für die Magen-Darmuntersuchung vorbereitet werden. Zu der Untersuchung soll er vollkommen nüchtern sein. Er soll am Tage vorher eine durchgreifende Darmentleerung vornehmen und vor der Untersuchung mindestens 8—10 Stunden keinerlei Ernährung oder Flüssigkeit zu sich genommen haben. Bei einer Erkrankung, die mit einer ausgesprochenen Gasentwicklung im Darm einhergeht, ist es sogar zweckmäßig, den Patienten mehrere Tage lang auf die Röntgenaufnahme vorzubereiten, denn die Röntgenuntersuchung bringt nur zuverlässige und brauchbare Resultate, wenn die Vorbedingungen so günstig wie möglich gestaltet werden. Der Arzt soll sich darum nicht vom Patienten drängen lassen, eine Röntgenuntersuchung ohne genügende Vorbereitung durchzuführen.

phot. Siemens-Reiniger-Werke A.-G.

Abb. 8. Vollständige Ansicht einer Diagnostikeinrichtung

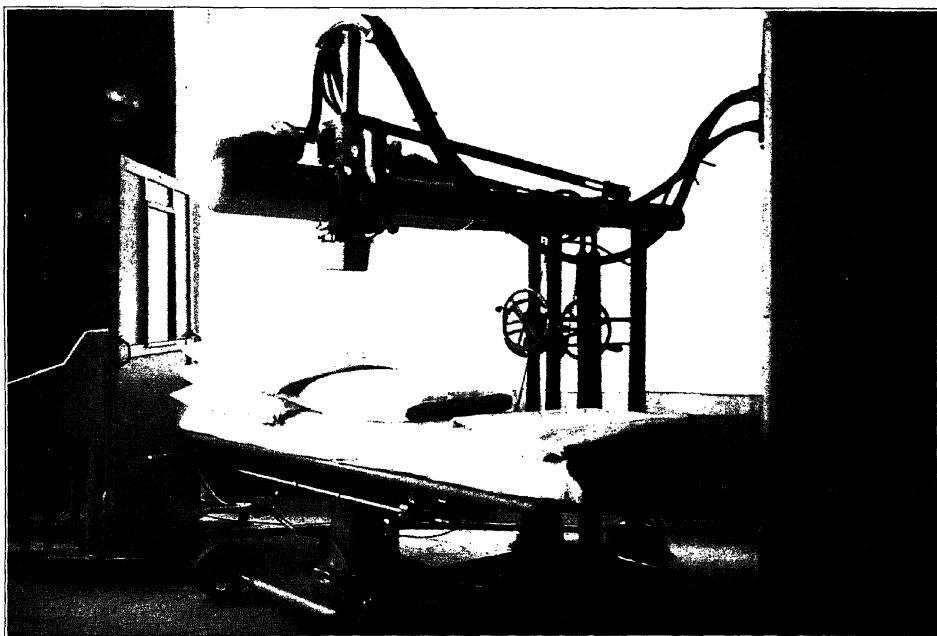



Abb. 9. Ansicht einer Therapieeinrichtung

Abb. 11. Röntgenbild eines Herzens mit Erweiterung des linken Vorhofes infolge einer Nierenerkrankung

Abb. 12. Röntgenaufnahme eines stark erweiterten Herzens

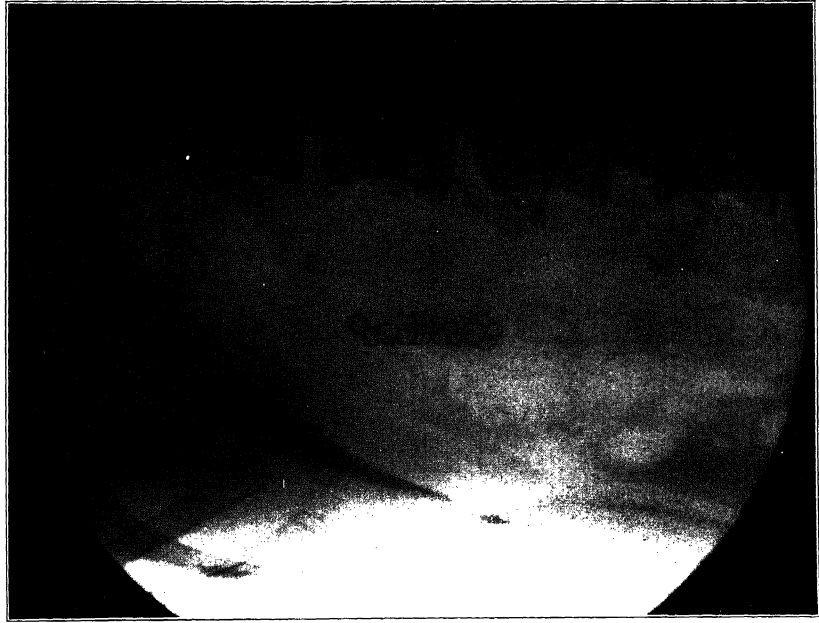



Abb. 13. Gallenblase mit Gallensteinen

Abb. 14. Kontrastfüllung der Gallenblase

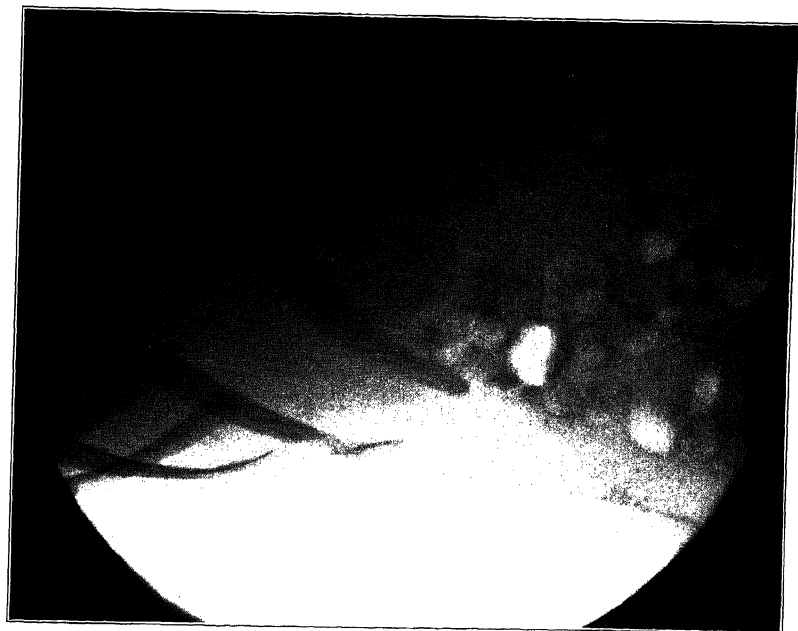



Abb. 15. Kontrastfüllung der Gallenblase mit Cholesterinsteinen

Abb. 16. Kontrastfüllung der Harnleiter und des Nierenbeckens (Doppelniere mit zwei Harnleitern)

Auf diese Weise lassen sich auch relativ kleine Veränderungen am Magen entdecken. Es gibt Erkrankungen, die zu einer starken Verdickung der Schleimhäute führen, die Schleimhautbilder weichen dann sehr vom normalen ab. Bei einem Magengeschwür ist ein Defekt in der Schleimhaut vorhanden. Ein millimetertiefer flacher Krater geht dann von innen her in die Magenwand. Da der Brei diesen Krater ausfüllt, so ergibt sich auf der Röntgenaufnahme ein Vorsprung an der sonst gleichmäßigen Kontur. Wir sprechen von einer „Nische", wobei aber nicht das Röntgenbild, sondern der anatomische Befund an der Magenschleimhaut der Vorstellung einer Nische entspricht. Auch beim Magenkrebs sind Zerstörungen der Schleimhäute da, doch macht das wilde Wachstum der Krebserkrankung auch geschwulstige Verdickungen; das Röntgenbild weist dann eine ganz unregelmäßige Kontur auf, teils mit Nischen, teils mit Vorwölbungen.

Zwölffingerdarmgeschwüre sind nicht einmal sehr selten, da sie aber relativ klein sind, so ist ihre Erkennung im Durchleuchtungsbild sehr schwierig, zumal man doch auf eine kurze Durchleuchtungszeit wegen der Gefahr einer Schädigung (Verbrennung) angewiesen ist. Man wird also gerade bei Verdacht auf Zwölffingerdarmgeschwüre mehrere Aufnahmen kurz hintereinander vornehmen, um den sehr beweglichen Darm aus verschiedenen Richtungen photographisch festzuhalten. Das sind dann sogenannte gezielte Aufnahmen, die unmittelbar nach der Durchleuchtung vorgenommen werden müssen. Das eingehende Studium dieser Aufnahmen ermöglicht dann später die exakte Diagnose.

In längeren oder kürzeren Zeitabständen wird der Durchgang des Breies durch den Dünndarm beobachtet, ebenso auch die Art und Weise der Dickdarmarbeit kontrolliert. Deshalb dauert eine Röntgenuntersuchung des Magen-Darmkanals zumindest 24, meist aber 48 Stunden, wobei die zeitlichen Abstände zwischen den einzelnen Durchleuchtungen und Aufnahmen verschieden lang sind.

Gallenblase

Die röntgenologische Untersuchung der Gallenblase ist im letzten Jahrzehnt besonders ausgearbeitet worden. Gallensteine bilden sich nur in seltenen Fällen bei den einfachen Aufnahmen ab; die Mehrzahl von ihnen, die sogenannten Cholesterinsteine, absorbieren das Röntgenlicht kaum mehr als die normalen Weichteile. Kontraste ergeben sich nur dann, wenn bei den Gallensteinen Kalkbeimischungen vorhanden sind, wobei sich dann meist um den weichen inneren Cholesterinstein eine Kalkschale aus Kalziumkarbonat bildet. Daher das eigenartige Bild bei der Darstellung (Abb. 13, Tf. 3).

Um nun Krankheitsveränderungen an der Gallenblase und vor allem die Cholesterinsteine nachzuweisen, war es notwendig ein Kontrastmittel der Galle beizumischen. Durch langjährige Versuche gelang es, das Problem in befriedigender Weise zu lösen. Das schattengebende Mittel wird durch die Leber als Beimischung der Galle ausgeschieden, nachdem es entweder durch den Magen

oder durch die Blutbahn dem Patienten zugeführt wurde. Als brauchbar hat sich das Natriumsalz des Tetrajodphenolphtaleins erwiesen, das unter dem Namen Jodtetragnost heute im Handel ist. Doch bedarf gerade diese Aufnahmetechnik einer besonders sorgfältigen Vorbereitung des Patienten, damit zuverlässig verwertbare Bilder erzielt werden. Die Abbildungen 14 und 15 (Tf. 3 und 4) zeigen eine Füllung der Gallenblase; die Aussparungen der zweiten Abbildung sind Cholesterinsteine.

Harnwege

In ähnlicher Weise wie bei der Gallenblase wird zur Darstellung der Harnwege eine Jod- oder Bromverbindung benutzt, die in die Blutbahn injiziert und durch die Niere wieder ausgeschieden wird. Damit kann man das Nierenbecken und die Harnleiter zur Darstellung bringen. Auch der Schatten der uringefüllten Blase bildet sich ab. Wenn es notwendig ist, die Kontraste stärker zu gestalten, so spritzt man ein schattengebendes Mittel — meist eine Silberverbindung — direkt in das Nierenbecken ein. Man führt mit Hilfe des Blasenspiegels (Cystoskop) einen dünnen Katheter durch die Harnleiter hinauf bis zum Nierenbecken und gibt dann tropfenweise das Kontrastmittel unter Zurückziehung des Katheters ein (Abb. 16, Tf. 4).

Röntgenologische Untersuchungen der Blase können auch mit Hilfe von Luftfüllung gemacht werden. Dazu wird die Blase zunächst durch den Katheter vollständig entleert und dann vorsichtig Luft in die Blase eingepumpt. Diese Luftfüllung ergibt einen Kontrast zum umliegenden Gebiet. Wenn also Geschwülste in die Blase hineinragen, so bilden diese sich ab, auch Einbuchtungen oder Verziehungen der Blasenwand durch außerhalb der Blasenwand liegende Geschwülste sind zu erkennen.

Wohl die meisten urologischen Röntgenuntersuchungen werden bei Verdacht auf Nieren-, Harnleiter- und Blasensteine vorgenommen. Sichtbar sind aber nur diejenigen Steine, die aus Phosphorsäure, Kohlensäure und oxalsaurem Kalk oder aus phosphorsaurer Ammoniakmagnesia bestehen. Sie absorbieren die Röntgenstrahlen und können somit dargestellt werden. Dagegen bilden sich harnsaure und Xanthinsteine nicht ab. Bei Verdacht auf solche Steine muß man zu der Kontrastmethode der intravenösen Einspritzung greifen.

Die Niere selbst besteht aus so dichtem Gewebe, daß ihre Darstellung durch die einfache Röntgenaufnahme bei guter Abblendung unter Anwendung der Buckyblende sehr häufig gelingt; auch ihre Konturen werden schärfer, wenn in die Blutbahn Kontrastmittel eingespritzt wurden.

Unterleibsorgane

Einer besonderen Darstellungstechnik sei noch gedacht, die in einzelnen Fällen hervorragendes leistet: es ist die Luftfüllung des Leibes, Pneumoperitoneum genannt. Die Methode besteht darin, daß man mit einer geeigneten Nadel, etwa

3 cm seitwärts und unterhalb des Nabels einsticht und steril gefilterte Luft langsam einpumpt. Durch geeignete Lagerung kann man die Konturen der einzelnen Bauchorgane klar im Röntgenbild wiedergeben, weil die Ränder z. B. der Leber, wenn sie von Luft umgeben werden, scharf hervortreten. Besonders wertvoll hat sich die Methode des Pneumoperitoneums bei der Darstellung der Unterleibsorgane der Frau erwiesen. Nach Einblasen der Luft wird auf einem drehbaren Tisch eine Beckenhochlage von etwa 45° hergestellt. Durch die nach oben steigende Luft werden die Därme zurückgedrängt und die Konturen der Gebärmutter, Eierstöcke und Eileiter von Luft umgeben. Bei der Aufnahme bilden sich dann die Organe deutlich ab. Durch stereoskopische Aufnahmen kann man eine ganz vorzügliche plastische Wiedergabe der Beckenorgane erzielen. Diese Technik des Beckenpneumoperitoneums kann noch durch die Gebärmutter- und Eileiterfüllung mit Hilfe eines Kontrastmittels (Jod- oder Bromöl) ergänzt werden, das durch den Muttermund in die Gebärmutter eingebracht wird. Diese Aufnahmehilfe wird auch häufig für sich allein angewendet, besonders dann, wenn die Durchgängigkeit der Eileiter geklärt werden soll. Dies zu wissen ist besonders dann wichtig, wenn eine Frau wegen Sterilität (Empfängnisunfähigkeit) untersucht wird.

Gerade dieses Beispiel zeigt, daß die Röntgenuntersuchungen mit Hilfe von Kontrastmitteln keineswegs nur eine schöne wissenschaftliche Technik sind, sondern daß sie eine weittragende praktische Bedeutung haben; die Schlüsse, die aus exakten Röntgenbildern gezogen werden, entscheiden häufig Differentialdiagnosen. Für die Schwangerschaftsaufnahmen im allgemeinen läßt sich die Lage des Kindes, auch die vermutete Zwillingsschwangerschaft durch einfache Untersuchungsmethoden klären. Aber es gibt doch ab und zu Fälle, bei denen die Röntgenaufnahme wichtige Hilfe leistet. Trotz der verschiedenen Schwangerschaftsdiagnosen kann eine Schwangerschaft im vierten oder fünften Monat noch fraglich sein, und in Differentialdiagnose zu einer Gebärmuttergeschwulst stehen. Eine exakte Röntgenaufnahme ergibt schnell die richtige Diagnose.

Auf die Wichtigkeit der exakten Beurteilung von Kindskopfgröße zu Beckengröße wurde schon hingewiesen. Auch die Einstellung des kindlichen Kopfes im Becken zeigt einwandfrei das Röntgenbild.

Den wichtigsten Dienst aber hat uns die Schwangerschaftsaufnahme als Lehrmaterial erwiesen. Der Student gewinnt besonders von der stereoskopischen Schwangerschaftsaufnahme ein so lebendiges Bild von der Lage des Kindes und von dem Durchgangsmechanismus des Kindes durch das Becken, wie es keine Zeichnung zu vermitteln vermag.

Gehirn, Rückenmark

Der Ausbau der Füllungstechnik (Kontrastmittelaufnahmen) schreitet immer noch fort. Für die Gehirndiagnostik werden Füllungen der Ventrikel vorgenom-

men. Durch ein kleines Bohrloch in die Schädelkapsel wird eine dünne Kanüle in eine der seitlichen Hirnkammern eingeführt, die Gehirnflüssigkeit (Liquor) entleert und Luft eingelassen. So erstaunlich dies für den Laien klingen mag, bei vorsichtigem Eingehen ist dieses Verfahren ungefährlich. Da sich in der Röntgenaufnahme die Ventrikel als luftgefüllte Kammern deutlich abgrenzen, kann man auch kleine Geschwülste photographisch entdecken. In ähnlicher Weise stellt man auch den Rückenmarkkanal dar, nur ist es hier zweckmäßig, ein absorbierendes Kontrastmittel einzulassen: ein Jod- oder Brommittel. Damit gelingt es, Verengerungen des Rückenmarks, sei es durch Verdickungen oder durch Geschwülste, genau festzustellen. Man kann sogar durch die Einspritzung geeigneter Kontrastmittel in die Hirnarterien am lebenden Menschen die Blutgefäßverzweigung des Gehirns abbilden und aus Defekten oder Abweichungen von Normalbildern Diagnosen stellen.

Meine kurze Übersicht über die Anwendung der Röntgenstrahlen als diagnostisches Hilfsmittel sollte lediglich in großen Zügen auf die einzelnen Gebiete hinweisen. Immer noch ist die Technik im Aufbau begriffen. Die nächsten Jahre werden uns noch leistungsfähigere Apparate bringen. Die medizinische Forschung wird neue Methoden erfinden, mit denen auch bisher Unmögliches ausführbar wird. Die Vereinigung der bildlichen Darstellung durch die Röntgenphotographie mit der Beobachtung der Vorgänge am lebenden Menschen während der Durchleuchtung, haben uns in das funktionelle Geschehen schon heute die tiefsten Einblicke ermittelt. Trotz allem liegt es nicht im Bestreben der Röntgendiagnostik sich zu emanzipieren. Sie soll auch bei noch besserer Ausgestaltung nur Befunde vermitteln, die unter klinischer Beurteilung im Rahmen weiterer Untersuchungsergebnisse verwendet werden können.

4. Die Röntgentherapie

Die biologischen Grundlagen

Die Voraussetzungen für die Möglichkeit im menschlichen Körper therapeutische Wirkungen mittels Röntgenstrahlen auszulösen, hat die Natur selbst gegeben: die einzelnen Zellen des menschlichen Körpers haben eine abgestufte Empfindlichkeit gegen Röntgenstrahlen. Für diese verschieden große Radiosensibilität gilt das Gesetz, daß eine Zelle, je jünger sie ist, um so höhere Empfindlichkeit besitzt. Die einzelnen Zellen haben die höchste Radiosensibilität im Teilungsstadium.

Da nun die bösartigen Geschwülste, Karzinome und Sarkome, entsprechend ihrer Wachstumstendenz in der Hauptsache aus jungen schnellebigen Zellen bestehen, so können Krebsgeschwülste mit Röntgenstrahlen zerstört werden, ohne daß die gesunden Körperzellen der Umgebung ebenfalls vernichtet werden.

Die Radiosensibilität der einzelnen Körperzellen ist eine relative. Man kann jede Zelle des menschlichen Körpers mit Röntgenstrahlen zerstören, wenn nur die Dosis entsprechend hoch gewählt wird. Dank der exakten Meßmöglichkeiten der Röntgenstrahlen hat die Forschung einen Einblick in die verschieden hohe Radiosensibilität der Zellen gebracht.

Angriffspunkt für die Röntgenstrahlen ist die Zelle; ihre Moleküle betrachten wir heute als ein System von Atomen, die in bestimmter Weise miteinander verkettet sind und schwingende Bewegungen ausführen. Trifft nun eine Strahlung in ein Molekül, so wird der Energiegehalt der Atome zweifellos verändert. Es treten Verschiebungen der Elektronen auf, die dadurch zur Veränderung ihrer Bahn veranlaßt werden, oder es wird überhaupt ein Elektron aus seiner Bahn herausgeschleudert und damit eine Veränderung in dem Planetensystem der Elektronen hervorgerufen.

Den Vorgang der Strahlenwirkung in der Zelle müssen wir als einen chemischen Prozeß ansprechen, weil durch die absorbierte Strahlung der Gesamtstoffwechsel der Zelle verändert wird. Es ist allerdings noch nicht bis zum letzten geklärt, ob dieser photochemische Prozeß unmittelbar ausgelöst wird oder indirekt auf dem Wege einer Temperaturerhöhung durch die Energieumsetzung in Wärme erfolgt.

Es ist aber nicht bloß der Zellkern — wie früher angenommen wurde —, der den Angriffspunkt der Strahlen bildet, auch im Protoplasma gehen chemische Veränderungen vor sich, die sich aber ihrerseits wieder rückwirkend am Zellkern bemerkbar machen. Dabei bleibt die von Hertwig schon 1912 gefundene Tatsache bestehen, daß den empfindlichsten Teil der Zelle der Zellkern darstellt.

Die Wirkung der Strahlen auf die Zelle kann man morphologisch nachweisen. Im Vordergrund steht die Pyknose des Zellkerns, die Verklumpung des Chromatins. Der geschädigte Kern zerfällt, seine Trümmer sind dann als verschieden große Körnchen im Protoplasma zu finden. Schließlich kommt es auch zu einer Verflüssigung des Protoplasmas, deshalb sieht man im mikroskopischen Bild die Vakuolen.

Wir sehen in solchen Bildern die zerstörende Wirkung der Strahlen. Wird aber nun eine kleinere Dosis eingestrahlt, dann treten nur Teilschädigungen auf. Je kleiner die Strahlenmenge, desto geringer sind die Veränderungen; es kann daher vorkommen, daß im histologischen Bild einer bestrahlten Gewebspartie überhaupt keine Veränderungen gefunden werden können.

Neben der tödlichen Wirkung der Strahlung auf die Zelle besteht also die Möglichkeit, daß sie den Angriff der Strahlung „übersteht". Sie wurde nicht zu Tode getroffen, sondern nur mehr oder weniger schwer geschädigt. Ob die Zelle diesen Schaden auszugleichen vermag, hängt von der Größe des Insults ab, dann aber auch von der Kraft, die der Zelle zum Ausgleich des Schadens zur Verfügung steht. Im bestrahlten Gebiet gibt es zweifellos neben dauernd ge-

schädigten Zellen solche, die sich von dem „Strahlenschaden" vollständig erholt haben, also wieder vollwertige Zellen geworden sind.

Diese Tatsache hat für den Ablauf der Strahlenwirkung und für das praktische Geschehen eine ganz große Bedeutung.

Es ist auch nicht abwegig die Möglichkeit anzunehmen, daß kleinste Strahlenmengen eine Leistungssteigerung der Zelle auszulösen vermögen, eine solche ist einwandfrei beobachtet und es besteht lediglich ein Zweifel darüber, wie man die Anregung zu einer solchen erhöhten Arbeitsleistung erklärt.

Ein weiterer wichtiger Vorgang in der Einwirkung der Strahlen auf die Zelle ist die Latenz. Darunter verstehen wir, daß eine von Strahlen getroffene Zelle zunächst noch weiter existiert. Im histologischen Bild unterscheidet sich eine solche Zelle in nichts von einer normalen Zelle, und trotzdem trägt sie den Todeskeim in sich. Ein Zellkonglomerat, z. B. eine bösartige Geschwulst, kann mit einer hinreichenden Dosis bestrahlt worden sein. Zunächst ändert sich weder Größe noch Aussehen der Geschwulst; erst mehrere Wochen später beginnt die Schrumpfung und Rückbildung. Solche Zellen sind dann nicht plötzlich abgetötet, sondern sie sind in ihrer Kernfunktion soweit getroffen, daß sie sich nicht mehr fortpflanzen können.

Die latente Wirkung der Strahlung kann sich aber noch anders bemerkbar machen; einmal dann, wenn die eingestrahlte Energie nicht einmal zur Beeinflussung der Teilungsfähigkeit des Kerns ausgereicht hat. Dann kann die Zelle noch weiterhin funktionieren, aber ihr Stoffwechselvorgang, ihr biologischer Zustand, ist geändert. Sie ist gegen weitere Schädigungen empfindlicher geworden, daher wird eine bestrahlte Gewebspartie auf eine weitere Bestrahlung in stärkerem Maße antworten, als dies bei der ersten Bestrahlung der Fall war. Die Strahlenwirkung wird kumuliert.

Die Kumulation ist abhängig von dem Funktionszustand der Zelle. Eine ruhende Zelle kumuliert in höherem Maße, denn ihr verlangsamter Stoffwechsel scheidet das „Strahlengift" wesentlich langsamer aus, als eine Zelle mit raschem Stoffwechselumsatz. Das ist vor allem für die schnellebige Krebszelle von besonderer Bedeutung, weil von ihr die Wirkung einer unterwertigen Strahlung leichter ausgeglichen wird, als bei einer Zelle mit langsamem Stoffwechsel. Auf diese Weise kann es sogar zu einer gewissen Gewöhnung der Krebszelle an Röntgenstrahlen kommen; ihre Strahlenempfindlichkeit wird herabgesetzt. Das ist einer der Gründe warum es zweckmäßig erscheint, die für eine Krebszelle tödliche Strahlenmenge in einer relativ kurzen Zeit zu applizieren.

Die Messung der Röntgenstrahlen

Röntgenstrahlen stellen ein differentes Heilmittel dar; die applizierte Strahlung muß daher qualitativ und quantitativ gemessen werden, um einerseits mit weitgehender Sicherheit einen Erfolg, etwa die Zerstörung einer Krebsgeschwulst, zu erreichen, andererseits Schädigungen auszuschalten.

Für die Tiefentherapie brauchen wir hochdurchdringungsfähige Strahlen, also solche, deren Strahlengemisch einen größeren Anteil möglichst kurzwelliger Strahlen enthält. Voraussetzung dafür ist eine geeignete Apparatur, die eine hohe Spannung (zirka 200000 Volt) erzeugt und Röntgenröhren, die für diese Spannung geeignet sind. Aber auch die so erzeugte Röntgenstrahlung enthält noch Strahlen größerer Wellenlänge (weiche Strahlen), die nur unnötig die Überschicht belasten. Daher werden diese Strahlen „gefiltert" und zwar durch Einschaltung einer Metallplatte (0,5–1 mm Kupfer oder Zink) in den Strahlengang. Die mittlere Wellenlänge der nun zur Einwirkung kommenden Strahlung liegt bei zirka 0,15 Angströmeinheiten, die kürzeste Wellenlänge dieser Strahlung bei 0,06 Angströmeinheiten. Da nun für die Tiefentherapie eine durchschnittliche Gewebstiefe von 10 cm in Frage kommt und eine Wasserschicht in ähnlicher Weise wie der menschliche Körper absorbiert, so benützt man als Messungsphantom einen mit Wasser gefüllten Kasten und bringt das Meßinstrument in verschiedene Tiefenschichten. Die so gewonnenen Strahlenangaben vermitteln eine Vorstellung über die im menschlichen Gewebe zur Wirkung kommende Strahlung. Für die besonders heute zur Anwendung kommende Therapiestrahlung ergibt sich unter der Voraussetzung einer Oberflächenfokusentfernung von 23 cm bei einem Einfallsfeld von 6×8 cm² in 10 cm Gewebs-(Wasser)tiefe eine Dosis von 22% der Oberflächendosis. Die reine Absorption in den 10 cm Gewebsschicht beträgt etwa 40%.

Die in der Tiefe vorhandene Dosis ist eine relative, deshalb ist auch der Fokus-Oberflächenabstand angegeben. Vergrößert man diesen, so wird das Verhältnis von Oberflächendosis zu derjenigen in der Tiefe verbessert. In der praktischen Therapie macht man sich diese Tatsache zunutze, um die Dosis in der Tiefe zu erhöhen. Der übliche Fokus-Hautabstand ist 30 cm, es gibt aber Fälle, in denen die Röntgenröhre auf 100 bis 120 cm entfernt wird.

Ein weiterer Faktor, der die Tiefendosis mitbestimmt, ist die Größe des Einfallsfeldes. Der Begriff Streustrahlen wurde schon einmal (s. S. 75) erwähnt. Für die Gegend des Zentralstrahles allein betrachtet, bedeutet die Streustrahlung zunächst eine Verminderung der eingestrahlten Dosis. Da aber das umliegende Gebiet (Wasser) ebenfalls Strahlen aussendet, so entsteht in der Tiefe eine Zusatzdosis und zwar hauptsächlich für die Mitte der Tiefenschicht. Daraus geht hervor, daß bei Verwendung eines größeren Einfallsfeldes die Streustrahlenzusatzdosis wächst, bei starker Verkleinerung dagegen wesentlich herabgeht. Man kann also durch Veränderung der Einfallsfeldgröße die Tiefendosis bestimmend verändern.

Die Dosis ist in der Mitte eines Einfallsfeldes am größten; nach dem Rande zu nimmt sie ab. Dies kann man schon an der Oberfläche (Haut) feststellen. Bei einem größeren Einfallsfeld etwa 15×15 cm² beträgt die Abnahme von der Mitte nach dem Rande zu bis zu 8%. In der Tiefenschicht ist der Unterschied

wesentlich größer, hier kann er bis zu 25% betragen. Dafür ist vor allem die Streustrahlung verantwortlich zu machen, weil nach dem Rande hin der Zusatz abnimmt.

Die Streustrahlung hängt ab von der Homogenität eines Mediums. Sie ist daher im Wasser oder in Muskelfleisch gleichmäßig, in einer Körperpartie aber, die luftgefüllte Därme enthält, ungleichmäßig. Da die Größe der Streustrahlung von der Dichte des Mediums abhängt, so ist die Streustrahlung der Luft wesentlich geringer als die des Wassers. In der Körpertiefe, hinter gasgefüllten Darmschlingen, ist daher die Dosis geringer als die experimentell im Wasserphantom gemessene.

Die quantitative Messung der Strahlen. Ältere Maßnahmen seien nur kurz angedeutet. Es wurden lange Zeit Streifen photographischen Papiers verwendet, die unter konstanten Bedingungen, unter festgelegter Zusammensetzung des Entwicklers in bestimmter Temperatur und bestimmter Zeit entwickelt wurden. Auch die Leitfähigkeitsänderung des Selens, wenn es dem Licht ausgesetzt wird, ermöglichte die Konstruktion eines Meßinstruments. Die modernen Methoden beruhen auf Ionisation der Luft und der Messung der Lichthelligkeit eines Fluoreszenzschirmes.

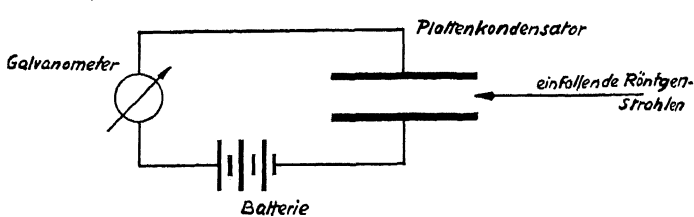



Abb. 17. Durch Gasstrecke unterbrochener Stromkreis. Ohne Röntgenstrahlen zeigt das Galvanometer keinen Strom. Durch Röntgenstrahleneinfall wird die Gasstrecke ionisiert, dann fließt ein Strom

Ionisation von Gasen. Röntgen hatte bereits beobachtet, daß Gase, also auch die Luft, unter dem Einfluß der Röntgenstrahlen leitend werden. Die darauf beruhende Methode zur Messung der Strahlenintensität ist wegen ihrer hohen Empfindlichkeit brauchbar und in neuerer Zeit weitgehend entwickelt worden.

Luft ist bekanntlich ein vorzüglicher Isolator für die Elektrizität, weil ihre Moleküle neutral sind und deshalb Elektrizität nicht zu transportieren vermögen. Die Abbildung 17 demonstriert einen nichtgeschlossenen Stromkreis, in den ein Strommeßinstrument (Galvanometer) eingeschaltet ist. Es fließt kein Strom, weil die Luft an der unterbrochenen Stelle nicht leitend ist. Schickt man nun einen Röntgenstrahlenkegel auf diese Stelle, so schlägt das Galvanometer aus, weil die durch die Strahlen ionisierte Luft den Elektrizitätsdurchgang ermöglicht.

Das Prinzip der Ionisation sei hier nur insoweit auseinandergesetzt, als es zum Verständnis der Zusammenhänge nötig ist. Röntgenstrahlen werden auch beim Durchgang durch die Luft in geringem Maße in den Luftmolekülen absorbiert. Dabei werden aus den Molekülen Elektronen ausgelöst. Die eines Elek-

trons beraubten Moleküle werden zu positiven Ionen. Die Elektronen treffen auf ihrer Bahn auf weitere Luftmoleküle und schlagen auch aus diesen Elektronen los. Ist ihre Energie verbraucht, dann lagern sie sich an neutrale Moleküle an und bilden mit diesen negative Ionen. Damit tritt im elektrischen Feld ein Strömen der negativen Ionen zur positiven Elektrode, der positiven Ionen zur negativen Elektrode ein. So entsteht ein elektrischer Transport, also ein Strom.

Zu exakten Messungen verwendet man große Ionisationskammern, die große Kondensatorplatten besitzen. Die im medizinischen Röntgenbetrieb verwendeten Ionisationsinstrumente haben Kleinkammern in der Größe eines Fingerhuts (Abb. 18). Die in ihnen bei Bestrahlung entstandenen Stromstärken sind äußerst gering, in der Größenordnung 10^{-12} bis 10^{-14} Ampere. Zur Messung so geringen Stromes braucht man entsprechend hochempfindliche Instrumente.

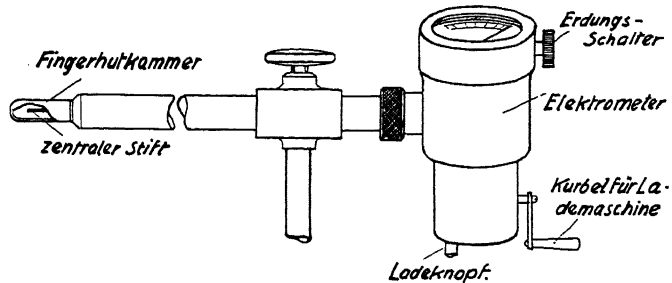



Abb. 18. Iontoquantimeter

Der elektrische Transport in der Ionisationskammer ist proportional zur Menge der auftreffenden Röntgenstrahlen. Das Zeigerinstrument (Spiegelgalvanometer) wird also um so stärker ausschlagen, je größer die Intensität der angewandten Röntgenstrahlung ist. Man kann auch das ganze System aufladen und ein Elektrometer einschalten. Die mit der Stoppuhr gemessene Ablaufzeit des Elektrometers setzt man reziprok als Dosis. Es gibt heute auch Meßinstrumente, die sich automatisch immer wieder aufladen und dabei die Zahl der Entladungen zählen, so daß sie während der ganzen Dauer der Bestrahlung zur Anwendung kommen können.

Trotz der physikalischen Exaktheit, auf der Prinzip und Konstruktion der Ionisationsmeßinstrumente beruhen, geben sie nur in der Hand des geübten und vorsichtigen Arbeiters zuverlässige Resultate. Dazu kommt, daß die gemessenen Werte in einem Verhältnis zur Wellenlänge stehen. Ferner muß man bedenken, daß auch die Luftfeuchtigkeit und die Ionisation der Luft bei Gewittern nicht vernachläßigt werden dürfen. Auch gegen den Transport sind die Ionisationsinstrumente sehr empfindlich.

Diese Nachteile vermeidet das Röntgenphotometer (Abb. 19; Wintz-Rump). Es ist darauf aufgebaut, daß die Helligkeit eines Leuchtschirms innerhalb sehr weiter Grenzen proportional der Röntgenstrahlungsintensität ist. Durch ein konstantes Vergleichssystem wird die verschiedene Helligkeit bei wechselnder Röntgenstrahlenintensität gemessen. Als Lichtquelle dient ein elektrisches

Normallämpchen mit 4 Volt-Akkumulator; das Licht geht durch ein Farbfilter, das genau auf die Farbe des Leuchtschirmes abgestimmt ist. Eine Prismenkombination erzeugt zwei Felder, ein ovales ringförmiges, das von dem Vergleichslämpchen erhellt wird und ein zentrales, das das Fluoreszenzlicht des

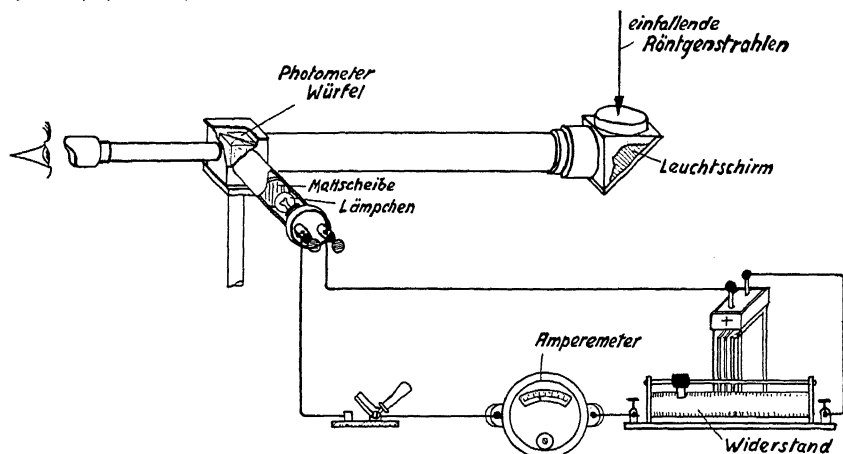



Abb. 19. Röntgenphotometer nach Wintz und Rump

unter 45° in den Röntgenstrahlengang gebrachten Leuchtschirms zeigt. Die Abgleichung der Lichthelligkeit des Lämpchens erfolgt durch Widerstände. Aus der abgelesenen Stromstärke ergibt sich nach Eichung direkt die Bestrahlungszeit zur Erreichung einer bestimmten Röntgendosis.

Die Röntgenstrahlendosis

Auf Grund der Messungen können physikalisch wohl definierte Mengen von Röntgenstrahlen in den Körper eingeführt werden, von denen ein gewisser Bruchteil in den verschiedenen Schichten absorbiert wird, während der Rest das bestrahlte Gebiet wieder verläßt. Wirksam ist nur die absorbierte Energie; sie als Dosis zu setzen wäre daher naheliegend. In der Praxis aber ist es wegen der ungleichmäßigen Verteilung der Energie im Körper, wegen der Änderung der Strahlenqualität und wegen der Unterschiede der Absorptionsfähigkeit der verschiedenen durchstrahlten Gewebsschichten unmöglich, auf solchem Wege einen exakten Dosisbegriff aufzustellen.

Daher wird nur die dem Körper zugeführte Energiemenge gemessen und als Dosis bezeichnet. Oberflächendosis ist die in der Bestrahlungszeit auf die Flächeneinheit des Bestrahlungsfeldes wirkende Röntgenstrahlenmenge. Sie erhöht sich durch die Streustrahlenzusatzdosis aus dem darunter liegenden Gebiet; sie wird in der Mitte des Bestrahlungsfeldes gemessen.

Die Tiefendosis ist die Dosis in einer bestimmten Körpertiefe, einschließlich der Streustrahlung. Sie wird gemessen in der Achse des Strahlenkegels.

Es war nun notwendig, zwischen den physikalisch festgelegten Röntgenstrahlenmengen und ihrem biologischen Effekt eine gewisse Korrelation zu finden; dazu diente die Empfindlichkeit und der Reaktionsablauf in der menschlichen Haut.

Fast immer ist in der Strahlentherapie die Haut die Eingangspforte, ihre Empfindlichkeit setzt die Grenze für die Bestrahlung. Wird eine Haut mit einer zu hohen Strahlendosis belegt, so entsteht eine Verbrennung. Es tritt ein Zustand ein, ganz ähnlich dem, den wir als Folge der Verbrennung der Haut mit einem sehr heißen Gegenstand kennen. Dieser Reaktion geht eine geringere voraus, das Erythem der Haut; auch dieser Zustand ist von der Sonnenbestrahlung her bekannt, wenn durch intensive Sonneneinwirkung eine starke Rötung der Haut eintritt.

Schon in der Frühzeit der Röntgentherapie wurde das Erythem der Haut als Maßstab für die anzuwendende Dosis genommen. Als dann später um 1913 Ionisationsinstrumente exakte Strahlenmessungen erlaubten, wurden von Krönig und Friedrich, Seitz und Wintz physikalisch gemessene Dosen festgelegt, die eine bestimmte Reaktion der Haut hervorriefen. Die von Seitz und Wintz geschaffene Hauteinheitsdosis, abgekürzt HED, ist der Maßbegriff für die Röntgentherapie geworden.

Unter HED versteht man eine unter bestimmten Bestrahlungsbedingungen applizierte Dosis, die nach 8–10 Tagen eine leichte Rötung und nach 4–6 Wochen eine deutliche Bräunung der Haut mit sich bringt. Bei diesen Versuchen hat sich gezeigt, daß die Reaktion der gesunden menschlichen Haut unter den einzelnen Individuen eine auffallend konstante ist. Die HED hat eine Schwankungsbreite nach oben und unten im höchsten Falle von 10%. Erkrankte Haut ist in ihrer Reaktionsfähigkeit heute hinreichend bekannt. Wir wissen, daß eine entzündliche Haut strahlenempfindlicher ist; wir wissen aber auch, daß bei bestimmten Erkrankungen mit einer höheren Empfindlichkeit gerechnet werden muß; so beim Basedow mit einer Erhöhung um 25%, bei Nierenkranken mit etwa 15%.

Für die einzelnen Tiefendosen spricht man von Prozenten der HED, obwohl streng genommen die physikalischen Grundlagen der HED nicht mehr Geltung haben. Da aber die Ausdrucksweise eine bestimmte Vorstellung vermittelt, hat man damit die Möglichkeit, sich über applizierte Dosen zu verständigen. Es war aber naheliegend, die Dosierung auf exakter physikalischer Grundlage zu vereinheitlichen und einen internationalen Standardwert zu schaffen. Dafür hat sich besonders die physikalisch-technische Reichsanstalt, vor allem Behnken eingesetzt. Es wurde eine exakte Ionisationsmethode ausgearbeitet und unter bestimmten Größenverhältnissen der Ionisationskammer bei festgelegtem Luftdruck und Temperatur die internationale Einheit mit der Bezeichnung r festgelegt. Mißt man in freier Luft, dann beträgt die Strahlenmenge, die auf der Haut die HED bewirkt, 600 r. Tatsächlich wird aber diese Reaktion durch die Streustrahlung

aus dem Gewebe mitbestimmt, mit Einschluß der Streustrahlung ist die HED daher gleich 800 r.

Die Vornahme der Bestrahlung geschieht mit geeichter Röhre bei festgelegten elektrischen Vorbedingungen. Man hat wohl Meßinstrumente, um die applizierte Dosis während der Bestrahlung kontrollieren zu können, doch ist die Eichung im praktischen Betrieb zweckmäßiger.

Die Eichung hat nicht bloß bestimmte elektrische Vorbedingungen für die Apparatur zur Voraussetzung, sondern sie verlangt auch bestimmte Größe des Einfallsfeldes und einen bestimmten Fokus-Hautabstand; müssen diese durch die Kontrollbedingungen des zu bestrahlenden Objekts verändert werden, so braucht man keine neuen Messungen, sondern man berechnet mit Hilfe von experimentell gefundenen Tabellen die nunmehrigen Veränderungen. Ein vergrößertes Einfallsfeld bedeutet eine größere Streustrahlenzusatzdosis und auch eine größere Tiefendosis. Bei der Bestrahlung aus großem Fokus-Hautabstand berechnet man die Verlängerung der Bestrahlungszeit nach dem Gesetz von der Abnahme der Strahlung im Quadrat der Entfernung. Da aber nun die geforderte Dosis in langer Zeit erreicht wird, so macht sich die Erholungsfähigkeit der Zellen geltend, und man muß noch eine „biologische Zusatzdosis" applizieren, die bei Vergrößerung des Abstandes von 30 cm auf einen Meter bis zu 25% betragen kann.

Die Ausführung einer Bestrahlung

Für eine aussichtsreiche Tiefentherapie ist zunächst die Kenntnis der für einen bestimmten Effekt notwendigen Strahlenmenge die Voraussetzung. Wir müssen aber auch wissen, wo die Grenze für die Schädigung gesunder Zellen liegt. Beides ist heute mit einer für biologisches Geschehen geradezu erstaunlichen Sicherheit bekannt. Beziehen wir uns auf die HED, so ergibt sich, daß für das Karzinom 90–100% der HED notwendig sind. Für die Eierstöcke, die bei starken menstrualen Blutungen bestrahlt werden, kommt eine Dosis von 34% der HED in Betracht. Werden sie mit 28% der HED belegt, dann können sich die Eierstöcke wieder im Laufe von 2 Jahren erholen; dies bedeutet die temporäre Sterilisation.

Von den Schädigungsdosen sei hier diejenige für die Mastdarmschleimhaut genannt, die 135% der HED beträgt. Die Radiosensibilität von Muskel- und Bindegewebe liegt bei 180 beziehungsweise 220% der HED.

Es sei nun an Beispielen gezeigt, wie das Vorgehen bei einer Bestrahlung auf Grund der physikalischen Messung und der Kenntnis der biologischen Dosis bestimmt wird.

Bei der Eierstockbestrahlung lautet die Forderung, daß jeder Eierstock mit 34% der HED belegt werden soll. Nun wissen wir aus der Messung in 10 cm Wassertiefe, daß unter bestimmten Vorbedingungen beim Fokus-Hautabstand

von 30 cm mit einem Einfallsfeld von 6×8 cm eine Tiefendosis von 22% der Oberflächendosis erreicht wird.

Die Eierstöcke liegen von der Bauchdecke aus gemessen in 6–10 cm Tiefe. Setzt man also die Röntgenröhre mit Tubus vorerst über den rechten Eierstock an, so erhält man bei einer Belastung der Haut mit 100% der HED die experimentell gefundene Tiefendosis von 22% der HED. Die restlichen 12% der HED kann man nun durch ein Einfallsfeld applizieren, das von rückwärts her bei Bauchlage der Patientin angesetzt wird. In gleicher Weise kann man beim linken Eierstock vorgehen, so daß also diese Eierstockbestrahlung mit Hilfe von 4 Einfallsfeldern der Größe von 6×8 cm vorgenommen wird. Man braucht aber auch die vorderen Einfallsfelder nicht bis zur Grenze der Ertragsfähigkeit der Haut, also mit einer HED zu belasten, sondern kann die Dosis für die hinteren Felder etwas höher einsetzen und so mit durchschnittlich 80% der HED pro Feld als Hautbelastung auskommen.

Als zweites Beispiel sei die Bestrahlung eines Gebärmutterkrebses genannt. Hierfür wird am Ort der Einwirkung 110% der HED gefordert. Über die anatomischen Verhältnisse sei kurz bemerkt, daß die Gebärmutter in der Mitte des Beckens liegt; bei Patientinnen mit mäßiger Fettauflage ist die Gebärmutter von den vorderen Bauchdecken etwa 10 cm entfernt, vom Rücken her ist die Entfernung 12–14 cm.

Zwei Einfallsfelder reichen also nicht aus, aber da das Becken eine gürtelförmige Anordnung der Einfallsfelder zuläßt, so kann man von der Bauchseite her 3 Einfallsfelder nebeneinander ansetzen, vom Rücken her ebenfalls 3 Einfallsfelder. Zieht man noch in Betracht, daß man bei der sogenannten gynäkologischen Untersuchungslage auch auf den Damm, beziehungsweise auch auf den Scheideneingang, ein Einfallsfeld anordnen kann, so ergibt sich, daß die Tiefendosis von 110% der HED leicht zu erreichen ist.

Tatsächlich weisen die Bestrahlungen von Gebärmutterkrebsen die besten Resultate unter den Krebsbestrahlungen auf. Der Grund liegt aber nicht, wie man früher meinte, in einer besonders hohen Radiosensibilität der Zellen des Gebärmutterkrebses, sondern in der besonders günstigen anatomischen Lage. Daher ist es auch kein Zufall, daß schon in einer Zeit, da die Apparaturen noch nicht so leistungsfähig waren und die Tiefendosis noch keine so große wie jetzt war, Erfolge beim Gebärmutterkrebs erzielt werden konnten.

Die so beschriebene Methode nennt man die Konzentrationsbestrahlung. Ihre Anwendung kommt bei allen Organen in Frage, die von verschiedenen Einfallsfeldern aus angegangen werden können. Liegt dagegen ein Krankheitsherd außerhalb der Mitte des Organismus oder sehr nahe der äußeren Haut, dann ist es unter Umständen sehr schwer, die krebszerstörende Dosis an Ort und Stelle zu bringen.

An einem dritten Beispiel soll nun gezeigt werden, wie die durch die Lage geschaffenen Schwierigkeiten bewältigt werden können.

Der Brustkrebs entwickelt sich knotenförmig in der weiblichen Brust. Meist liegt der Knoten kurz unter der Haut und reicht bis zur Basis der Brust. Hier ist nun die Forderung zu erfüllen, die krebszerstörende Dosis bis in die tiefer gelegenen Teile der Brust, etwa 5 cm unter die Haut zu bringen. Zur Verfügung steht nur eine Einfallsrichtung. Wollte man aus dem gleichen Abstand wie bei der Kreuzfeuermethode (30 cm) die 100% der HED in dieser Tiefe von 5 cm erreichen, so müßte man auf der Hautoberfläche um ein vielfaches überdosieren und eine schwere Verbrennung wäre die Folge. Diese absichtlich zu setzen, um den Krebs zu zerstören, hat keinen Zweck, weil ein solches Vorgehen die Strahlentherapie zu keiner besseren Methode machen würde als die im Altertum geübte, bei der man mit glühenden Eisen die Krebsgeschwulst ausbrannte.

Wir wissen, daß der Krebs sehr bald eine Verbreitungstendenz in das umliegende Drüsengewebe hat. Beim Brustkrebs (Mammacarcinom) ist es zuerst das Drüsengebiet der Achselhöhle, dann die Drüsen der Schlüsselbeingrube und schließlich die nach dem Brustfell zu gelegenen Drüsen. Da wir selbst beim kleinsten Brustkrebs nicht wissen können, ob sich nicht schon Krebszellen im umliegenden Gebiet befinden, so müssen wir also folgerichtig das ganze Drüsengebiet mitbestrahlen. Das bedeutet die Notwendigkeit einer Applikation der krebszerstörenden Dosis auf einer Einfallsfläche vom Ohr bis zum Rippenbogen und vom Brustbein bis zum breiten Rückenmuskel. Dabei soll diese Dosis bis zu 4 cm Tiefe wirken. Für 110% der HED ist diese Forderung unerfüllbar, also müssen wir uns mit der unteren Grenze begnügen, die bei 90% der HED liegt. Um aber die widerstandsfähigen Zellen auch noch abzutöten, muß diese Dosis nach etwa 8 Wochen wiederholt werden, während wir beim Gebärmutterkrebs oder bei anderen Lokalisationen, bei denen sich die krebszerstörende Dosis sicher erreichen läßt, uns mit einer einzigen Bestrahlung begnügen können.

Aber auch die Forderung der 90% der HED ist nicht leicht zu erfüllen, denn die Haut darf gerade bei einem so großen Einfallsfeld nicht überlastet werden. Hier wird nun die einzig mögliche weitgehende Verbesserung der Tiefendosis angewandt, nämlich der große Abstand. So bestrahlen wir das Brustkarzinom aus Abständen je nach dem einzelnen Fall von 90–120 cm, was eine Bestrahlungszeit von durchschnittlich 2½ Stunden benötigt. Diese Technik heißt die F e r n b e s t r a h l u n g.

Konzentrationsmethode und Fernbestrahlung werden auch kombiniert angewandt. So kann es Fälle geben, bei denen etwa wie bei der Bestrahlung des Magenkarzinoms von vorn ein Fernfeld, vom Rücken dagegen mehrere Konzentrationsfelder appliziert werden. Starre Methoden sind in der Röntgentherapie ebenso unzweckmäßig wie bei der Operationstechnik.

Die Anwendungsmöglichkeiten der Röntgenstrahlen in der Therapie

Die Wirkung der Röntgenstrahlen auf die Zelle ist abhängig von der Größe der zugeführten Dosis. Der am häufigsten gewünschte Effekt ist die Vernichtung der Zelle. Mit kleineren Dosen wird man auch eine Umstimmung der Zelle, eine Veränderung ihres Stoffwechsels und ihrer Arbeitsleistung erreichen können; schließlich ist es auch mit unserer Vorstellung über den biologischen Strahleneffekt wohl vereinbar, daß kleinste Röntgenstrahlenmengen im Sinne einer Energiezufuhr wirken und somit eine Leistungssteigerung der Zelle erreicht wird.

Die Wiener Schule hat eine Zeitlang jede Reizwirkung der Strahlung abgelehnt und die biologischen Ergebnisse der Anwendung kleinster Röntgenstrahlenmengen lediglich im Sinne der zerstörenden Kraft der Strahlen zu erklären versucht. Diese zum größten Teil gezwungenen Schlußfolgerungen sind aber nicht haltbar.

Die Krebsbestrahlung ist diejenige medizinische Anwendung der Strahlen, bei der völlige Zellzerstörung beabsichtigt wird. Es ist einwandfrei bewiesen, daß eine Aussicht auf Beseitigung und später Heilung des Krebses nur dann besteht, wenn alle Krebszellen diejenige Strahlenmenge erhalten haben, die wir als krebszerstörende Dosis (Karzinomdosis) bezeichnen. Dabei ist es gleichgültig, ob diese Dosis auf einmal (in einer Sitzung) oder verteilt auf mehrere Tage appliziert wurde. Im letzteren Falle ist nur die Erholungsfähigkeit der Zelle durch eine Zusatzdosis auszugleichen. Es muß aber auch an dieser Stelle scharf betont werden, daß es eine Zerstörung der Krebszelle oder eine Rückbildung der Krebszelle nicht gibt, wenn eine zu kleine oder unterwertige Dosis angewandt wurde. Vorstellungen, wie sie bei manchem Radiotherapeuten vor etwa 10 Jahren herrschten, daß durch eine kleine Röntgenbestrahlung das Stützgewebe (Bindegewebe) einen hinreichenden Anreiz erführe und dann die Krebszellen erdrossle, sind vollkommen abwegig und heute von niemand mehr berücksichtigt.

Die Forderung, daß beim Krebs die krebszerstörende Dosis angewendet werden müßte, bringt in vielen Fällen eine relativ große Belastung des Organismus mit sich; denn um eine große Dosis in die Tiefe zu bringen, muß man häufig die an sich gesunde Überschicht mit einer größeren Strahlenmenge belegen und daher dem Organismus eine größere Volumdosis einverleiben. Das Geheimnis einer erfolgreichen Röntgentherapie des Krebses besteht also darin, daß der Arzt an sein medizinisches, physikalisches und technisches Können, an seine Apparatur und vor allem auch an den Patienten die höchsten Anforderungen stellt. Viele Strahlentherapeuten lehnen aus diesem Grunde die sogenannte ambulante Bestrahlung bei Krebsgeschwülsten ab und verlangen einen Krankenhausaufenthalt. Mit der Applikation der Strahlen allein ist es bei der Krebsbehandlung nicht getan; denn nach der Bestrahlung wird der Organismus mit den Zerfallprodukten der abgetöteten Zellen belastet. Er muß diese Toxine unschädlich machen

und aus dem Körper ausschwemmen. Die gesunden durchstrahlten Zellen werden ebenfalls in ihrer Funktion gestört, auch sie geben Produkte ihres veränderten Stoffwechsels ab, die als Toxine auf den Organismus wirken. Endlich muß die Regenerationskraft des Körpers einsetzen, und an die Stelle des zerstörten Krebses neues gesundes Gewebe setzen; bei einer erfolgreichen Krebsbehandlung ist also die Röntgenbestrahlung eine Maßnahme im Rahmen der Gesamtbehandlung, allerdings die wichtigste.

Die Strahlenbehandlung des Krebses ist eine örtlich begrenzte Maßnahme. Sie steht im Grunde genommen auf einer Linie mit der Operation, sie übertrifft diese aber, weil die Reichweite der Strahlen eine wesentlich größere ist als die des Messers. Als Beispiel sei ein Brustkrebs genannt. Wenn in der weiblichen Brust ein beginnender Krebs sich als abgegrenzter vielleicht kirschgroßer Knoten befindet und die Krebswucherung noch vollkommen auf diesen Knoten beschränkt ist, so ist es möglich durch eine radikale Operation im gesunden Körperteil, also durch Wegnahme der Brust, die Patientin dauernd von ihrem Krebs zu heilen. Röntgenstrahlen können die Krebszellen in diesem Knoten zerstören, sie können in einem solchen Falle kein besseres Resultat als die Operation erreichen. Die Statistiken sind für diese beginnenden Fälle — die leider sehr selten zur Behandlung kommen — gleich gute. Das Bild ändert sich aber stark zugunsten der Röntgentherapie, wenn der Krebs bereits in das Drüsenausbreitungsgebiet eingebrochen ist, wenn in der Achselhöhle dicke Drüsen vorhanden sind, oder sogar schon in der Schlüsselbeingrube. In solchen Fällen kann wohl der Chirurg die Brust abnehmen und die Drüsen aus der Achselhöhle und aus der Schlüsselbeingrube entfernen, aber da das ganze Gewebe mit mikroskopisch kleinen Krebsnestern übersät ist, so wird es schon ein glücklicher Zufall sein müssen, wenn es ihm gelungen ist, alles krebsige Gewebe zu entfernen. Daß dies meist nicht möglich ist, zeigen die schlechten Ergebnisse der Statistik. Hier kann nun die Röntgentherapie viel mehr leisten. Sie kann mit der krebszerstörenden Dosis das ganze Gebiet wirklich erfassen; die Heilungsziffern sind für solche Fälle erstaunlich hohe. Sie können nicht die 100% erreichen, weil eben meist der Krebs das lokale Ausbreitungsgebiet schon überschritten hat, und außerhalb der bestrahlten Zone sich Filialgeschwülste gebildet haben. An denen geht der Mensch dann zugrunde.

Diese Darlegungen zeigen, daß Heilungsaussichten für die Behandlung mit Röntgenstrahlen nur beim lokalisierten Krebs bestehen. Es ist sinnlos, bei einem Krebs, der schon fernliegende Filialgeschwülste (Metastasen) gebildet hat, noch eine Röntgentherapie anwenden zu wollen. Man kann nicht den ganzen Menschen einer Gesamtbestrahlung unterziehen, die so hoch wäre, daß damit alle Krebszellen abgetötet würden. Die damit einverleibte Volumdosis hätte eine schwerste Blutschädigung zur Folge, an der der Mensch in kurzer Zeit sterben müßte.

Auch für die Röntgentherapie steht und fällt das Heilungsproblem des Krebses

mit der frühzeitigen Erfassung, da sie nur dem lokalisierten Krebs gegenüber wirkungsvoll ist.

Durchblättert man die Weltliteratur nach den Ergebnissen der Strahlenbehandlung des Krebses, so wird es dem Laien auffallen, daß die mit Abstand besten Resultate beim Gebärmutterkrebs und beim Brustkrebs vorliegen. Es ist auch kein Zufall, daß gerade die Gynäkologen die Strahlenbehandlung der Krebse im weiblichen Becken bevorzugt anwenden. Wie schon an anderer Stelle gezeigt, liegt dies in der besonders günstigen Lokalisation des Gebärmutterkrebses, bei dem die krebszerstörende Dosis ziemlich einfach und mit großer Exaktheit erreicht werden kann. Dazu kommt, daß die Gebärmutter nach der Bestrahlung ein wertloses Organ ist, das keinerlei Aufgaben mehr zu erfüllen hat und auch keinem Reiz in der Rückbildungszeit unterliegt. Im Gegensatz dazu nenne ich den Mastdarm.

Der Darmkrebs geht zwar von der Darmschleimhaut aus, er durchwuchert aber bald die Darmwand. Wenn nun durch die Röntgentherapie die Krebsgeschwulst zerstört, der Darm aber durch den passierenden Inhalt weiter in Anspruch genommen würde, muß die Darmwand zerreißen. Es kann also niemals eine alleinige Röntgentherapie des Darmes geben, sondern es wird immer notwendig sein, die Bestrahlung mit einer Operation zu kombinieren; das befallene Darmstück muß ausgeschaltet werden. Wenn die Krebsgeschwulst im Enddarm sitzt, wird ein künstlicher After angelegt; ist eine höher gelegene Darmpartie befallen, wird durch eine innere Darmverbindung die befallene Darmschlinge ausgeschaltet. Ähnlich wäre auch beim Magen vorzugehen, wenn der Krebs im Pförtner sitzt. Gerade beim Magenkarzinom hat man noch keine nennenswerten Erfolge mit der Röntgenbehandlung erzielt. Abgesehen von der Schwierigkeit der Dosierung ist es beim Magen bedenklich eine sehr hohe Dosis anzuwenden, weil die Magenschleimhaut zerfällt und es zu unstillbaren Blutungen kommen kann. Für die hinter dem Magen liegende Bauchspeicheldrüse sind die für die Karzinomzerstörung notwendigen Dosen keinesfalls gleichgültig. Gerade aus diesen kurzen Andeutungen kann auch der Laie entnehmen, welche Schwierigkeiten bei der Strahlentherapie auftreten und daß es eben nicht genügt, einen Patienten einfach unter die Röntgenröhre zu legen.

Es mag weiter interessieren, daß der Hautkrebs für die Röntgentherapie sehr günstig ist. Das gleiche kann man nicht vom oberflächlich liegendem Krebs überhaupt sagen. Eines der schwierigsten Gebiete ist zweifellos der Lippen-, Zungen- und Wangenkrebs, weil es in Hinblick auf die geringe Streustrahlung außerordentlich schwer ist, die in Frage kommende Dosis zu erreichen.

Um eine Vorstellung über die Heilerfolge beim Krebs mit der Strahlentherapie zu vermitteln, sollen kurz noch einige Zahlenwerte angegeben werden. Von Heilung darf man nur sprechen, wenn 5 Jahre nach Abschluß der Behandlung verstrichen sind, denn nach dieser Zeit ist das Wiederauftreten (Rezidiv) beim Krebs

schon eine große Seltenheit geworden. Daß ein Krebs nach fünfjähriger Heilung überhaupt nicht mehr auftritt, ist ebenfalls nicht richtig. Vielleicht handelt es sich in solchen Fällen um neue Krebsgeschwülste bei Menschen mit ausgesprochener Krebsdisposition.

Für den Gebärmutterkrebs – richtiger Krebs im Gebärmuttermund – nennt die Weltstatistik eine Heilungsziffer von 35–40%. Erfahrene Krebstherapeuten erreichen mit der Strahlentherapie sogar 70–75% Heilungen. Wohlgemerkt ist dies nur möglich beim lokalisierten Krebs, einem Krankheitszustande, den der Operateur als „operabel" bezeichnet.

Hat der Krebs bereits auf seine Umgebung übergegriffen, sind also große Krebsverdickungen im Becken schon da, dann sinken die Ergebnisziffern auf etwa 12–14% herab.

Beim Brustkrebs wird die Strahlentherapie nur von verhältnismäßig wenig Spezialisten angewendet. Die besten erreichten Heilungswerte liegen für den lokalisierten Brustkrebs bei ungefähr 80%. Bemerkenswert sind Zahlen aus einem Krebsinstitut, gewonnen an einer großen Anzahl von Patientinnen, bei denen es sich um eine sehr fortgeschrittene Erkrankung handelte. Es sind Frauen, denen wegen Brustkrebs die Brust schon abgenommen war, und bei denen neue Krebsknoten (Rezidive) wieder aufgetreten sind. Damit hat die Krankheit ein Stadium erreicht, bei dem meist chirurgisch keine Hilfe mehr geleistet werden kann und bei dem auch andere chemische oder Arzneimittel keinen Zweck haben. Drei Jahre nach Abschluß der Röntgenbehandlung waren 34% dieser vorher verlorenen Patientinnen gesund und arbeitsfähig. Diese Zahl ist wohl der beste Beweis für den Wert und die Leistungsfähigkeit der Strahlentherapie.

Über die Verbindung von Operation und Nachbestrahlung gehen die Ansichten der Forscher noch weit auseinander. Eine unstreitbare Berechtigung hat die Nachbestrahlung dann, wenn nur ein Teil der Geschwulst entfernt werden konnte. Sie ist dagegen nicht imstande, das neue Auftreten eines Krebses zu verhindern; denn die Vorstadien der Krebszellen haben eine relativ geringe Radiosensibilität und können nicht durch die krebszerstörende Dosis an ihrer Entwicklung zum Krebs gehindert werden. Im Laufe der nächsten Jahre wird sicherlich mehr die Vorbestrahlung in den Vordergrund treten.

Nach der Krebsbestrahlung ist wohl das größte Anwendungsgebiet der Röntgenstrahlen die Behandlung der verstärkten Gebärmutterblutungen bei der Frau. Da diese Blutungen durch eine fehlerhafte innersekretorische Leistung der Eierstöcke bedingt sind, ebenso wie die Myomentwicklung, so werden die Eierstöcke bestrahlt und dadurch jener Vorgang nachgeahmt, der im natürlichen Klimakterium sich abspielt. Da die einzelnen Zellen des Eierstocks (richtiger der Eierstocksfollikel) eine verschieden hohe Strahlenempfindlichkeit haben, so kann man auch eine temporäre Ausschaltung der Eierstockstätigkeit ausführen und

dadurch die Blutungen auf 1–3 Jahre sistieren. Auch zum Zwecke der eugenischen Sterilisation wird die Bestrahlung angewandt.

Die Anwendung der Strahlen bei der Myomkrankheit ist heute zu einem so zuverlässigen Verfahren ausgebaut, daß sie als die Methode der Wahl bezeichnet werden muß. Nur ganz vereinzelte Fälle müssen der Operation zugeführt werden, so z. B. sehr große – etwa mannskopfgroße – Myome oder solche Geschwülste, bei denen die Diagnose nicht ganz sicher steht. Im übrigen ist es angesichts der Erfolge der Strahlentherapie nicht mehr berechtigt, eine Patientin durch die Operation zu gefährden. Die Röntgenbehandlung des Myoms besteht in einer Bestrahlung, ausgeführt in zirka zwei Stunden. Dann stellen die Eierstöcke im Laufe von drei Monaten ihre Tätigkeit ein, die Geschwulst schrumpft langsam und ist in 9–12 Monaten meist zurückgebildet.

Günstige Erfolge sind mit der Strahlentherapie auch bei Blutkrankheiten erzielt worden. Die verschiedenen Bestandteile des strömenden Blutes sind sehr strahlenempfindlich, besonders die weißen Blutkörperchen. Die Leukämie ist eine Erkrankung, die mit einer Vermehrung der weißen Blutkörperchen einhergeht; 50–80fache Vermehrung der Normalzahl wird manchmal beobachtet. Durch eine abgestufte Bestrahlung des strömenden Blutes ist es möglich die Erkrankung sehr günstig zu beeinflussen.

Die Behandlung der Störungen der inneren Sekretion haben sich auch schon als ein dankbares Anwendungsgebiet für die Strahlentherapie erwiesen. Auf die Überproduktion einer Drüse kann durch verschieden hohe Dosierung abgestuft eingewirkt werden. Als Beispiel sei die Basedowsche Krankheit genannt, die eine Überfunktion der Schilddrüse ist. Gerade bei dieser Erkrankung ist bereits eine große Anzahl von Heilerfolgen durch zweckmäßige Bestrahlung im Rahmen einer Gesamtbehandlung erreicht worden. Außer den Drüsen mit innerer Sekretion, auf die günstig mit Röntgenstrahlen eingewirkt werden kann, gibt es noch eine ganze Reihe an sich gutartiger Geschwülste, die gleichfalls mit Röntgenstrahlen angegangen werden können. Erfahrungen liegen bei den Geschwülsten der Zirbeldrüse oder solchen des Thymus vor.

Röntgenstrahlen werden auch bei Erkrankungen angewandt, bei denen Wirkungsmechanismus und Erfolg nicht ohne weiteres offenkundig sind, hierzu sei das Bronchialasthma genannt; in geeigneten Fällen sind sehr günstige Wirkungen beobachtet worden. Auch bei gutartigen Magen-Darmerkrankungen, wie etwa bei Magen-Darmgeschwüren, Darmkrämpfen (Spasmen) werden Röntgenstrahlen angewandt. Versuche, die chronische Arthritis (Gelenkentzündung) mit Röntgenstrahlen zu beeinflussen, liegen vor. Als größeres Anwendungsgebiet sei noch die Tuberkulose genannt, und zwar die Lungentuberkulose, die Knochen- und Gelenktuberkulose und die Bauchfelltuberkulose. Gerade bei dieser letzten Art sind zahlreiche Erfolge zu vermerken. Als unterstützende Behandlung wird bei der Knochen- und Gelenktuberkulose von den

Röntgenstrahlen Gebrauch gemacht. Bei der Lungentuberkulose ist die Sanatoriumsbehandlung und die Sonnentherapie bevorzugt, doch werden auch die Röntgenstrahlen von einzelnen Spezialisten ganz systematisch angewendet. Die Wirkungsweise der Strahlen ist eine sehr langsame. Man wendet keine großen Dosen an, sondern versucht mit kleineren Strahlenmengen die Vernarbung in der Lunge anzuregen oder zu befördern.

Es sei noch der sogenannten Reizbestrahlung gedacht. Unter der Vorstellung, daß ganz kleine Strahlenmengen eine leistungssteigernde Wirkung haben, hat man vor allen Dingen bei schlecht funktionierenden Drüsen mit innerer Sekretion die Röntgenstrahlen zur Anwendung gebracht. Bei Unterfunktion des Eierstocks wurde früher öfter die Reizbestrahlung gemacht, jetzt stehen gewichtige Bedenken im Hinblick auf eine gewisse Erbschädigung entgegen. Auch die Hebung der Schilddrüsenfunktion soll möglich sein; in der Literatur werden positive Ergebnisse berichtet, besonders bei idiotischen und in den allgemeinen Lebensäußerungen zurückbleibenden Kindern, bei denen die Unterfunktion der innersekretorischen Drüsen als Grund angesehen wird. Reizbestrahlungen finden auch bei schlecht heilenden Knochenbrüchen statt oder bei eiterigen Wunden, die sich nach einer Röntgenstrahlenbehandlung in kleinen Dosen sehr schnell reinigen.

Mit diesen kurzen Beispielen ist das Anwendungsgebiet der Röntgenstrahlen in der Medizin längst nicht erschöpft; es konnten lediglich nur die wichtigsten Behandlungsarten dargelegt werden. Ein Allheilmittel sind die Röntgenstrahlen sicher nicht, und jede Überschätzung und unbegründete Anwendung schadet der Forschung und dem Ansehen der Medizin.

5. Die Strahlenschädigung

Die Wirkungen der Röntgenstrahlen auf den menschlichen Organismus wurden empirisch gefunden; dienten doch die Strahlen zunächst diagnostischen Zwecken. Menschen, die häufig durchleuchtet wurden, zeigten Hautverbrennungen.

Die therapeutischen Maßnahmen gingen von diesen Beobachtungen aus; die ungewollt entstandenen Effekte wurden reproduziert, wenn sie nutzbringend für die Heilbehandlung erschienen. Je mehr die Röntgenstrahlen angewandt wurden, desto größer wurde die Erkenntnis, daß Strahlenschäden sehr leicht eintreten können. Heute besitzen wir einen ganz guten Überblick und können daher die strahlentherapeutischen Maßnahmen relativ ungefährlich gestalten. Die Zeit der gefürchteten Hautverbrennungen muß als überwunden gelten.

Die Art der Schäden, die durch Röntgenstrahlen gesetzt werden können, sind mannigfaltig; es gibt

1. lokale Schädigungen,
2. Allgemeinschädigungen.

In beiden Gruppen gibt es alle möglichen Grade von Schädigungen; harm-

lose, die durch die Leistungsfähigkeit des Organismus wieder ausgeglichen werden können, und solche, die eine so schwere Beeinträchtigung des Körpers mit sich bringen, daß der Mensch an ihnen zugrunde geht.

Unter den lokalen Schädigungen lassen sich wiederum drei Gruppen unterscheiden: a) die akut einsetzende Schädigung: die Verbrennung, b) die langsam sich entwickelnden chronischen Schädigungen, c) die latenten Schädigungen, die erst durch das Hinzukommen einer weiteren Noxe manifest werden (Kombinationsschädigung).

Die Verbrennungen wurden als Hautschädigungen in der ersten Zeit der Röntgentherapie bekannt. Sie entstanden, wenn die applizierte Dosis die Ertragsfähigkeit der Haut überschritt, sie ähneln in ihrem Aussehen den durch Hitzeeinwirkungen gesetzten Schäden, wenn auch ihr Verlauf ein anderer ist.

Zuerst gab es nur Hautschädigungen. Mit der Verbesserung der Tiefenwirkung der Strahlen traten durch Überdosierung in der Gewebstiefe die gleichen Schädigungen auf. Zunächst Entzündungen, dann geschwüriger Zerfall und Einschmelzung des Gewebes.

Man hat auch für die Hautschädigungen gewisse Reaktionsgrade aufgestellt. Sie sind abhängig von der Größe der applizierten Dosis. Nachdem aber durch die heute wesentlich verbesserte Tiefenwirkung der Röntgenstrahlen eine dickere Gewebsschicht von der Wirkung der Röntgenstrahlen getroffen wird, so ist die Überschreitung der Dosis bei Anwendung der Tiefentherapiestrahlung wesentlich bedenklicher, als etwa eine Verbrennung mit Diagnostikstrahlung.

Die exakte Meßmethodik gestattet heute mit Sicherheit eine Hautverbrennung auszuschalten. Natürlich ist es möglich, daß Störungen der Apparatur oder im Meßinstrument, oder schließlich Versagen der menschlichen Aufmerksamkeit doch noch zu einer Verbrennung führen; wie eben auch trotz aller erdenklichen Vorsichtsmaßnahmen Eisenbahnunfälle vorkommen. Aber im großen und ganzen kann wohl behauptet werden, daß die Furcht des Publikums vor einer Röntgenverbrennung heute nicht mehr gerechtfertigt ist.

Einer besonderen Schädigung der Haut oder des tiefliegenden Gewebes muß noch gedacht werden: der latenten Gewebsschädigung und der Induration.

Wenn eine Hautstelle mit einer Dosis von 50% der HED bestrahlt wurde, so sieht man an dieser Hautstelle nicht die geringste Reaktion. Es tritt weder eine Rötung noch eine Bräunung (Pigmentation) auf. Setzt man aber den Patienten in ein heißes Bad, oder macht heiße Auflagen, etwa mit der Leibflasche, so treten die Feldgrenzen deutlich hervor; der bestrahlte Bezirk ist gerötet. Dies beweist, daß in den Blutgefäßen eine bestimmte Wirkung der Röntgenstrahlen vor sich gegangen ist; die Gefäße erweitern sich infolge der Wärmewirkung. Setzt man der bestrahlten Stelle mit weiteren heißen Auflagen längere Zeit zu, dann kann sogar eine länger dauernde Rötung und eben erkennbare Schwel-

lung im bestrahlten Gebiet eintreten. Die Strahlen haben einen Ort verminderter Widerstandsfähigkeit geschaffen. Die sog. Hauteinheitsdosis betrachten wir als an der unteren Grenze der Ertragsfähigkeit der Haut gelegen. Hier tritt die Rötung nach der Bestrahlung und die Braunfärbung (Pigmentation) 4 bis 6 Wochen später auf. Eine fühlbare Änderung der Haut ist jedoch nicht vorhanden, auch keine Schwellung. Diese tritt aber durch die heißen Auflagen auf; bei längerer Fortsetzung der Heißwasseranwendung entsteht eine richtige Verdickung der Haut. Die Poren treten auseinander, das Aussehen der Haut erinnert an Schweinsleder. Wir nennen den Zustand Induration oder indurierendes Oedem; die Gefäße sind für die Blut- und Lymphflüssigkeit durchlässiger geworden, das Gewebe ist wasserdurchtränkt. Die Zellen der Blut- und Lymphgefäße haben eine Schädigung erlitten.

Die Induration bildet sich langsam wieder zurück, weil eben diese Schädigung noch ausgeglichen werden kann (reversible Schädigung).

Die Induration wird aber nicht bloß durch die hinzukommende Wärmewirkung ausgelöst, auch der Eisbeutel oder irgendeine andere an sich harmlose Noxe, wie Knetmassage oder scharf wirkende Salben, können ähnliche Zustände hervorrufen. Auch die mehrfach in großen Abständen vorgenommene Bestrahlung der Haut, mit Dosen, die an sich keine Verbrennung bewirken würden (90–100% der HED) führen schließlich zur Induration.

Die Induration und die Veranlassung zu ihrer Entstehung ist ärztlich besonders zu berücksichtigen, daher müssen den bestrahlten Patienten strenge Verbote bezüglich heißer Bäder, heißer Auflagen, Einreibungen mit differenten Salben und ähnliches gegeben werden. Der Röntgentherapeut muß berücksichtigen, daß eine indurierte Haut gegen Röntgenstrahlen sehr empfindlich geworden ist. Er kann also einem solchen Gewebe eine höhere Dosis nicht mehr zumuten. Die Widerstandslosigkeit der Induration ist besonders bedenklich gegenüber Infektionen. Ein Furunkel im indurierten Gebiet kann einen schweren Zerfall der Hautpartie hervorrufen. Ebenso dürfen auch Einschnitte oder operative Eingriffe im indurierten Gebiet nicht vorgenommen werden, weil ebenfalls ein großer Gewebszerfall die Folge sein kann.

Es wurde bisher immer nur von Induration der Haut gesprochen; da die Induration eine Folge der Gefäßschädigung ist, so können Indurationen überall auftreten, besonders an solchen Körperstellen, an denen ein lockeres Gewebe vorhanden ist. Daher gibt es auch Indurationen im lockeren Beckenbindegewebe, etwa in der Umgebung der Blase, oder in der weiblichen Brust, nach entsprechend hoch dosierter Bestrahlung. Auch die Unterkinngegend ist besonders für Indurationen geeignet.

Trotzdem die Induration eine an sich ernste Komplikation darstellt, muß für den Laien immer wieder betont werden, daß sie prognostisch günstig zu bewerten ist, wenn eine weitere Schädigung ausgeschlossen werden kann. Auch ausgedehnte

schwielige Indurationen können sich vollständig zurückbilden, jedoch bedarf es hierzu mehrerer Jahre.

Auf eine besondere Lokalisation der Induration sei noch kurz hingewiesen: auf die Lungeninduration. In einer Zeit, in der die Bestrahlung des Mammakarzinoms technisch noch nicht so gut ausgebildet war wie heute, wurden Lungenindurationen öfters beobachtet. Infolge der Gefäßschädigung erfolgte der Austritt von Blutflüssigkeit ins umliegende Gewebe. Ihre klinische Bedeutung bestand in der Ausschaltung größerer Lungenpartien. Eine solche Patientin ist besonders dann schwer gefährdet, wenn sie eine Lungen- oder Rippenfellentzündung bekommt. Heute werden Lungenindurationen fast nicht mehr beobachtet, obwohl immer noch die Möglichkeit dann besteht, wenn kurz nach der Bestrahlung die Patientin eine fieberhafte Bronchitis, Lungen- oder Rippenfellentzündung bekommt.

Die Spätschädigung

In der Literatur und auch bei Laien hat der Begriff Spätschädigung viel von sich reden gemacht. Es gab sogar eine Zeit, in der man eine ganz unbestimmte Angst vor der Applikation auch als harmlos erkannter Dosen hatte, weil man fürchtete, es könnten viele Jahre nachher Schädigungen, ja Gewebszerfall auftreten.

Es muß als vollkommen unrichtig bezeichnet werden, wenn in der Literatur davon gesprochen wird, daß an bestrahlten Hautpartien, an denen nichts zu sehen war, die keinerlei Indurationen aufwiesen, nach vielen Jahren, ohne jede größere Einwirkung von außen, eine Röntgenschädigung aufgetreten sei. Ich konnte eine ganze Reihe angeblicher Spätschädigungen, teils als Berater, teils als Gutachter genauer untersuchen. Immer stellte sich heraus, daß es sich tatsächlich als auslösendes Moment um eine stärkere Einwirkung auf das bestrahlte Gebiet handelte. So war eine Frau etwa 9 Jahre vorher in der Gegend des unteren Teiles des Rückens mit Röntgenstrahlen behandelt worden. In der Inflationszeit trug sie relativ schwere Lasten, mit einem an sich unzweckmäßigen Tragkorb, der mit dem Aufstellfuß stark auf die bestrahlte Stelle drückte und auch scheuerte. Es entstand ein Geschwür mit schlechter Heilungstendenz. Bei einer anderen Patientin, die wegen eines Gebärmutterkrebses mehrmals bestrahlt worden war, bestand ungefähr 3 Jahre lang eine deutliche Induration an der vorderen Bauchwand. Durch starke Anstrengung bei einmaligem schweren Heben, kam es zur Zerreißung von kleinen Blutgefäßen mit einem Bluterguß; dieser vereiterte. Ein tiefer, ausgebreiteter Gewebszerfall trat ein. Wir haben es hier nicht mit einer Spätschädigung zu tun, sondern mit einer typischen Kombinationsschädigung. Gewiß hatten die Röntgenstrahlen einen Ort verminderter Widerstandsfähigkeit im Gewebe gesetzt. Die ausgedehnte Nekrose wäre jedoch nie von selbst entstanden, wenn nicht die außergewöhnliche Kraftanstrengung die Gefäße ververletzt hätte.

Auch diese meine Ausführungen über die Spätschädigung waren für den Laien notwendig, damit nicht die geheime Angst vor einer „nicht zu vermeidenden" Spätschädigung ihn veranlaßt, eine erforderliche Röntgenbestrahlung abzulehnen oder hinauszuschieben.

Die Schädigung an den Generationsorganen

Die Eierstöcke. Die Strahlenempfindlichkeit der wichtigen Zellen der Eierstöcke, der Follikel, wurde schon frühzeitig erkannt. Nunmehr stellen die Eierstocksbestrahlungen eine sehr wichtige Therapie in der Frauenheilkunde dar.

Durch den Reifungsvorgang wird der Primordialfollikel zum Graafschen Follikel. Das reife Ei gelangt durch den Eileiter in die Gebärmutter. Diese Eireife findet alle 4 Wochen in der Mitte zwischen zwei Regeln statt. Wenn also eine Frau vom 1.–4. eines Monats ihre Regel hat, so bekommt sie um den 13ten ein reifes Ei. Dieses soll nun befruchtet werden, und zwar treffen die Samenfäden (Spermatozoen) das Eichen im Eileiter; dann wird das befruchtete Ei nach der Gebärmutter zu weitergeschoben. Es siedelt sich in der Gebärmutterschleimhaut an. Damit diese Einnistung möglichst leicht vonstatten gehe, wird sie durch eine starke Auflockerung der Gebärmutterschleimhaut vorbereitet. Dies ist die Aufgabe der innersekretorischen Produkte des corpus luteum, des gelben Körpers. Es bilden sich nach Ausstoßung des Eies aus dem Graafschen Follikel, dessen Randzellen durch stark wucherndes Wachstum im Laufe von einigen Tagen zu einer innersekretorischen Drüse um, deren Produkte Durchblutung, Auflockerung und Vergrößerung der Gebärmutterschleimhaut bewirken.

Findet nun die Befruchtung nicht statt, so war die ganze Vorbereitung zur Einnistung des befruchteten Eies zwecklos. In großzügiger Weise stößt nun die Natur die so veränderte Gebärmutterschleimhaut aus, und zwar mit Hilfe der Blutungen, die wir Menstruation nennen; dazu das abgestorbene Ei. Kurz nach der Menstruation findet dann ein neuer Aufbau der Gebärmutterschleimhaut statt, unter der Mithilfe innersekretorischer Produkte des Eierstocks.

Der Eierstock produziert also nicht bloß die zur Befruchtung bestimmten Eier. Er steuert auch die Menstruation, außerdem werden durch spezielle innersekretorische Produkte des Eierstocks die spezifisch weiblichen Eigenschaften mitbedingt, so die Ausgestaltung der sekundären Geschlechtsmerkmale, der Brüste, die weiche zarte Haut der Frau, der spezifische Fettstoffwechsel. Schließlich bestehen auch Wirkungen auf Geschlechtsempfindungen und Geschlechtsbedürfnis.

Es gibt nun Erkrankungen des Eierstocks, Störungen in seinen innersekretorischen Zellen. So kann z. B. die Steuerung des richtigen Ablaufs der Menstruation gestört sein. Die blutungauslösenden Momente überwiegen; die Frau leidet also unter sehr starken Blutungen. Es können auch Schleimhautveränderungen, wie etwa eine starke Entzündung, die Blutungen verursachen. Eine

besondere Art der schlechteren Funktion (Dysfunktion) des Eierstocks ist ein eigenartiger Reiz auf die Gebärmuskulatur. Es entstehen die knotigen Geschwülste, die wir Myome nennen, wobei diese Dysfunktion auch gleichzeitig sehr starke Menstruationsblutungen bewirkt.

Man wird natürlich, wenn es sich lediglich um starke Menstruationsblutungen handelt, nicht gleich zur Röntgenbestrahlung greifen, sondern erst harmlosere Methoden versuchen, die nicht den Menstruationszyklus stillegen. Die gefahrlose Röntgenbehandlung ist aber immer noch operativen Eingriffen vorzuziehen. Diese durch Strahlen bedingte „Ausschaltung" der Ovarien ist nicht identisch mit dem operativen Vorgang, bei dem die Ovarien entfernt werden. Die Operation bedingt die Kastration. Bei der richtig durchgeführten Röntgenbestrahlung wird aber nicht jede Zellfunktion des Eierstocks abgetötet. Es bleiben innersekretorisch wirkende Zellen erhalten; die den Körper und die Psyche der Frau beeinflussende innere Sekretion bleibt erhalten, gerade hierin liegt der große Vorzug der Strahlentherapie.

Die richtige Bestrahlung der Eierstöcke ist, wie schon weiter oben dargelegt wurde, eine wichtige therapeutische Maßnahme in der Gynäkologie. Von einer Schädigung muß man dann sprechen, wenn entweder die Bestrahlung mit einer unbeabsichtigt großen Dosis erfolgte, oder wenn überhaupt die Eierstöcke vor jeder, auch der kleinsten, Strahlendosis bewahrt bleiben sollten. Auch bei der Dauerausschaltung der Eierstockstätigkeit soll die innersekretorische Funktion auf den Allgemeinkörper erhalten bleiben. Die Reifung zum Graafschen Follikel und die Bildung des corpus luteum wird mit einer Dosis von 34% der HED hintan gehalten, die Überdosierung von 45% der HED bringt eine völlige Einstellung aller Funktionen mit sich. Geschieht eine solche Überdosierung bei der 50jährigen Frau, die ohnedies der Menopause, dem Matronenalter, nahe ist, so hat sie keine sehr große Bedeutung. Bei der 35jährigen Frau, die wegen starker Myomblutungen bestrahlt wurde, sind die konstitutionellen Folgen schon sehr erheblich, weil die Ausfallerscheinungen die noch relativ junge Frau sehr belasten. Um eine Lebensgefahr handelt es sich natürlich nicht.

Bei der Vornahme der temporären Sterilisation (siehe S. 98) muß die Dosis ganz exakt gewählt werden, weil bei Überschreitung der Dosis von 28% der HED der Ausfall der Menstruation, die Daueramenorrhoe, eintritt.

Ein besonders schwieriges Gebiet ist die R e i z b e s t r a h l u n g des Eierstocks. Anhänger dieser Methode behaupten, daß man bei unterwertiger Entwicklung des Genitales mit kleinen Röntgenstrahlendosen (5–10% der HED) eine Stimulation (Reizung) auf den Eierstock ausüben, und ihn zu erhöhter Tätigkeit anregen kann. Ich lehne diese Methode ab, da ihre Wirkungsweise unsicher ist und wir auch nicht sicher wissen, ob nicht die typischen Zellen des unterwertigen Ovars eine besonders hohe Radiosensibilität haben. Deshalb liegt eine Schädigung des Ovars im Bereich der Möglichkeit.

Über weitere Bedenken gegenüber dieser Methode wurde bereits in anderem Zusammenhang gesprochen.

Daß ungewollt Röntgenstrahlen den Eierstock treffen, kann vorkommen: bei Bestrahlung extragenitaler Erkrankungen, also z. B. bei Milzbestrahlung oder Ekzembestrahlung.

In einer Zeit, da man noch nicht einen guten Strahlenschutz hatte, da die Umhüllung der Röhre noch nicht einwandfrei war, trafen vagabundierende Röntgenstrahlen auch andere Körperstellen. Damit war die Möglichkeit gegeben, daß auch die Eierstöcke von winzigen Strahlenmengen getroffen wurden. Auch die im Körper selbst unter guten Schutzmaßnahmen entstehenden Streustrahlen können zu den Ovarien gelangen.

Auch das Bedienungspersonal, Frauen und Männer, können an den Eierstöcken beziehungsweise Hoden durch kleine Röntgenstrahlenmengen getroffen werden. Diese sind insofern höher zu bewerten als die ungewollten Strahlen beim Patienten, weil für die mit Röntgenstrahlen Arbeitenden die Summation kleinster Strahlenmengen allmählich eine größere Höhe erreichen kann.

Es ist nun heute noch eine Streitfrage, ob solche kleinste Röntgenstrahlenmengen tatsächlich als schädlich zu betrachten sind. Bis vor wenigen Jahren wurde dies allgemein abgelehnt. Von seiten der Erbforscher aber wird gegen die Schadlosigkeit eingewendet, daß auch ein einziger Röntgenstrahl genügen könne, eine dauernde Veränderung im Sinne der Keimschädigung hervorzurufen. Sie stützen sich dabei auf Ergebnisse, die von dem amerikanischen Zoologen Morgan und seinen Schülern an der Bananenfliege (Drosophila melanogaster) erzielt wurden. H. J. Muller hat zum erstenmal bewiesen, daß durch Röntgenstrahlen die Erbmasse beeinflußt werden kann. Von einer ganzen Reihe deutscher Autoren wurden aber Einwendungen dagegen gemacht, die Ergebnisse an der Bananenfliege ohne weiteres auf den Menschen zu übertragen.

Die Klärung der ganzen Angelegenheit ist immer noch im Fluß. Die Befürchtungen der Erbforscher haben aber dazu geführt, mit der Anwendung der Röntgenstrahlen am Menschen sehr zurückhaltend zu sein, was übrigens jeder seriöse Röntgentherapeut auch schon ohnedies gewesen ist. Hier über den Streit der Keimschädigung durch Röntgenstrahlen Näheres auszuführen, erscheint mir unrichtig, zumal es gar nicht möglich ist, dem Leser die wichtigen Grundlagen zur Beurteilung der ganzen Frage zu vermitteln.

Bedenklich ist, wenn kurz vor der Befruchtung Röntgenstrahlen Eier oder Spermatozoen treffen. Eine Schädigung ist möglich, wenn ein befruchtungsbereites Eichen im Eileiter ist und eine, wenn auch kleinere Röntgenstrahlenmenge auf den Unterleib der Frau appliziert wird. Selbst mehrere Röntgenaufnahmen darf man nicht als ungefährlich bezeichnen, denn immerhin ist der Eizelle auch mit der diagnostischen Strahlung eine, wenn auch kleine, Röntgenstrahlenmenge zugeführt worden. Wenn nun am gleichen Tag dieses Ei mit

einem Spermatozoen zusammentrifft, so könnte eine geschädigte Frucht entstehen. Wenn eine therapeutische Bestrahlung ein Ei im befruchtungsbereiten Zustand trifft, dann ist, wenn es befruchtet wird, die Schädigung zweifellos eine größere. Wir nennen in der Röntgentherapie ein solches Vorkommnis eine Frühbefruchtung. Interessant ist, daß derartige Fälle mit Sicherheit noch nicht beobachtet wurden. Im Tierexperiment hat man gesehen, daß das strahlengeschädigte Ei abstirbt. Wahrscheinlich wird es beim Menschen ebenso sein, wenn auch der Berliner Erbforscher Fischer mit der theoretischen Möglichkeit rechnet, daß Eichen mit geringer Schädigung weiter bestehen können, die sich dann im Kinde auswirken.

Ich halte es für richtig diese Befürchtung zu beachten. Nach der Bestrahlung von möglicherweise konzeptionsfähigen Frauen verlangen wir eine 2–3 monatige Karenzzeit in bezug auf die Empfängnis; konsequentermaßen sollte auch dann die Empfängnis unterbleiben, wenn bei röntgendiagnostischen Untersuchungen eine größere Anzahl Durchleuchtungen und Aufnahmen gemacht worden sind.

Mit anderen Autoren verneine ich die Schädigungsmöglichkeit für diejenigen Kinder, die nach Ablauf einer temporären Sterilisation gezeugt wurden. Es gibt in der Literatur niedergelegte zahlreiche Beobachtungen, bei denen nach Ablauf einer temporären Sterilisation gezeugte Kinder genau untersucht wurden. Was die Befürchtungen Fischers anbelangt, daß durch Schädigung des Chromosomenapparates eine kranke Nachkommenschaft entstehen könne, so sind die weiteren experimentellen Ergebnisse noch abzuwarten. Es erscheint mir aber wesentlich, wie bei anderen Chromosomengiften der Vorsicht Rechnung zu tragen. Sicher ist es falsch, die Nachkommen röntgenbestrahlter Mütter (temporäre Sterilisation) oder mit Röntgenstrahlen arbeitender Väter (Mütter) als erbkrank zu betrachten. Dazu besteht wirklich nicht der geringste Grund, wenn es auch zweckmäßig erscheint, daß die Nachkommen der oben genannten Väter und Mütter nicht miteinander die Ehe eingehen.

Zu dieser speziellen Frage der Nachkommenschaftsschädigung ist von Forschern, die nur in ihrem jeweiligen Arbeitsgebiet erfahren waren, viel unnötige Beunruhigung in weite Kreise getragen worden. Übrigens ist die Indikation zur temporären Sterilisation so außerordentlich selten, daß es eine schwere Übertreibung wäre, von einer Verschlechterung des Erbgutes unseres Volkes zu sprechen.

Die Hoden. Dank der Arbeit einer großen Anzahl ernster Forscher sind wir über die Frage der Röntgenschädigung des Hodens ziemlich genau orientiert. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, daß die Hodenzellen im allgemeinen weniger strahlenempfindlich sind, als die Zellen des Ovars, auch daß die Erholungsfähigkeit offenbar in viel höherem Maße beim Hoden vorhanden ist, als beim Ovarium. Die temporäre Sterilisationsdosis dürfte wohl bei 50% der HED liegen, die der Dauersterilisation erst bei 100% der HED. Untersuchungen haben gezeigt, daß bei Röntgenologen und bei Röntgentechnikern ein großer Prozentsatz steriler

Ehen vorhanden ist. Das läßt den Schluß zu, daß gerade beim Hoden die Kumulation kleinster Dosen eine besondere Rolle spielt.

Schäden an der im Mutterleib bestrahlten Frucht

Der im Mutterleib heranwachsende Fötus besteht aus jungen Zellen, die sich schnell vermehren, daher muß der Fötus als hoch radiosensibel angesehen werden. Einwandfreie Tierversuche, wie auch Bestrahlungen am Menschen haben Schädigungen ergeben. Je größer die Röntgenstrahlenmenge und je jünger die Frucht, desto schwerer die Schädigung. Ein junges Ei kann so stark geschädigt werden, daß es abstirbt. Waren die Früchte, die von Röntgenstrahlen getroffen wurden, schon etwas größer, so entstanden Mißbildungen. Die Entstehung einer solchen Mißbildung hängt davon ab, welche Körperstelle eine größere Dosis bekommen hat. Wir können geradezu von typischen Schädigungen sprechen: geistige Defekte bis zur Idiotie infolge schwerer Schädigung des Zentralnervensystems, Mikrozephalie; Mißbildungen am Auge, Ohr, am Geschlechtsapparat und an den Gliedmaßen wurden ebenfalls beobachtet.

Bestrahlungen der schwangeren Gebärmutter werden durch diagnostische Irrtümer veranlaßt. Die vergrößerte schwangere Gebärmutter wird für eine Geschwulst gehalten, etwa ein Sarkom, und mit einer höheren Dosis belegt. Auch bei Eierstocksbestrahlungen wird die Gebärmutter von einer größeren Strahlenmenge betroffen. Wenn es sich zufällig um eine Schwangerschaft handelt, entsteht eine Mißbildung; daher kann der Arzt nicht peinlich genug die Möglichkeit einer Schwangerschaft berücksichtigen. Derartige Mißbildungen und durch Röntgenstrahlen erzeugte Idioten dürfen nicht weiterhin die Seele einer Mutter und die Fürsorge des Volkes belasten.

Es wird zwar in der Literatur gar nicht so selten darauf hingewiesen, daß trotz irrtümlicher Bestrahlung ein ungeschädigtes Kind geboren wurde. Solche Fälle lassen nur eine Erklärung zu, daß der Fötus entweder von ganz geringen Strahlenmengen oder durch Zufall überhaupt nicht von Strahlen getroffen wurde. Vielleicht war die Richtung des Strahlenkegels eine besonders günstige, oder es war eine Störung im Apparat vorhanden, es entstand ein Geräusch, aber keine Röntgenstrahlen. Ein glücklicher Zufall hat den Fötus vor Röntgenstrahlen bewahrt: strahlenfeste Föten gibt es nicht.

Eine wichtige Frage sei noch berührt: kann ein Fötus auch auf indirektem Wege eine Strahlenschädigung erleiden, wenn die Mutter an einer von der Gebärmutter entfernten Körpergegend mit Röntgenstrahlen behandelt wird? Hierzu ist zu bedenken, daß zwar heute bei den gut gesicherten Röntgenröhren vagabundierende Strahlen nicht mehr vorkommen. Es gibt jedoch Luftstreustrahlen bei der Bestrahlung aus großem Abstand, die Streustrahlen aus dem Körper, und endlich noch aus der Unterlage, auf der die Patientin liegt. Es läßt sich also gar nicht vermeiden, daß Strahlen an die Gebärmutter kommen. Weiter

ist zu bedenken, daß durch jede Bestrahlung Zellzerfallsprodukte entstehen, die ihrerseits toxisch auf den Fötus wirken können.

Das ist die Begründung unseres Standpunktes, von therapeutischen Bestrahlungen bei schwangeren Frauen Abstand zu nehmen; natürlich nicht, wenn es sich um einen Krebs handelt, dessen Behandlung keinen Aufschub erduldet. Da muß eben die Schwangerschaft unterbrochen werden. Auch mit diagnostischen Maßnahmen sind wir bei schwangeren Frauen sehr zurückhaltend, besonders bei solchen, die eine ganze Reihe von Aufnahmen und Durchleuchtungen erfordern. Auch Aufnahmen zur Diagnose der Schwangerschaft, oder zur Feststellung der Lage des Kindes, soll man auf das Mindestmaß beschränken.

Schwangere Frauen sollen allen jenen Stätten fernbleiben, in denen mit Röntgenstrahlen gearbeitet wird.

Chronische Hautschädigungen durch Röntgenstrahlen

Chronische Hautschädigungen bestehen dann, wenn monate- oder jahrelang geringe Strahlenmengen auf die gleiche Hautstelle einwirken. Eine solche Schädigung kommt bei Patienten nicht vor, wohl aber bei denen, die mit Röntgenstrahlen arbeiten: Techniker, Physiker, Laborantinnen, Ärzte. Diese Schädigungen gehören im großen und ganzen der Vergangenheit an, entstanden in einer Zeit, da wir gezwungen waren, mit ungenügendem Schutz zu arbeiten und die Schädigungsmöglichkeiten nicht kannten.

Es waren nicht allein die Röntgenstrahlen, die die Hautveränderungen hervorriefen, sondern auch die Behandlung der Hände mit Desinfektionsmitteln (Operationsvorbereitung), oder mit photographischen Chemikalien. An den geschädigten Stellen wird die Haut hart, sie schrumpft (wird atrophisch), die Hautfalten sind vertieft, die oberste Hautschicht wird aufgelockert und verdickt; Schweiß- und Talgdrüsen sind zerstört, die Haare sind ausgefallen, es treten blutende Schrunden auf, die allmählich zerfallen und Geschwüre mit schlechter Heilungstendenz hinterlassen. Schließlich finden sich dann auch Stellen, bei denen ein ausgesprochenes überstürztes Zellwachstum vorhanden ist; dies ist dann der Beginn eines Röntgenkarzinoms! Dieser Strahlenkrebs ist in seinen Anfängen nicht einmal sehr bösartig. Wird die Hand rechtzeitig amputiert, kann der Mensch geheilt werden. Wird zulange gewartet, dann verbreitet sich der Strahlenkrebs auf dem Lymphwege, die nächsten Drüsen werden befallen, und wie bei anderen Krebsen tritt auch der Tod ein. Eine nicht kleine Anzahl von Röntgenologen und Röntgenphysikern sind an solchen Strahlenkrebsen verstorben; als Pionieren der Forschung bewahrt ihnen die Wissenschaft ein besonderes Andenken.

Die Tatsache, daß durch die Reizung mit Röntgenstrahlen echte Karzinome erzeugt werden können, ließ Bedenken gegen die Strahlenanwendung überhaupt entstehen. Die Forschung hat aber bewiesen, daß der Wachstumsmechanismus des Röntgenkarzinoms auf ganz anderen Voraussetzungen beruht, als dies bei den

therapeutischen Bestrahlungen der Fall ist. Wenn überhaupt bei Patienten an bestrahlten Stellen Karzinome auftreten, so ist dies auf dem Umwege einer Tiefenverbrennung. Hier war es nicht die Röntgenstrahlenwirkung, sondern der chemische Reiz des Eiweißzerfalls.

Wir müssen es ablehnen, daß etwa durch die dem Körper einverleibten Röntgenstrahlen eine Krebsdisposition geschaffen werden könne. Wahrscheinlich ist das Gegenteil der Fall, denn die Statistik zeigt, daß Krebse bei röntgenbestrahlten Patienten auch nach Jahren außerordentlich selten sind.

6. Die Allgemeinschädigung

Die Strahlenintoxikation

Als man begann, große Röntgenstrahlenmengen dem Organismus einzuverleiben, wurde als Reaktion eine Allgemeinwirkung beobachtet, ähnlich der Seekrankheit, die sich in Übelsein, Erbrechen, Schwindel, Kopfschmerzen äußerte. Der dafür geprägte Ausdruck „Röntgenkater" will vor allem dartun, daß die Erscheinungen harmlos sind, wenn auch für den Patienten selbst ein schweres Krankheitsgefühl vorhanden sein kann. Es werden alle Stadien zwischen leichtestem Übelsein und schwerer Beeinträchtigung beobachtet, wenn auch jenes unstillbare Erbrechen und Elendsein, wie es auch für die Seekrankheit charakteristisch ist, kaum vorkommt.

Als Ursache des Röntgenkaters wurden im Laufe der Zeit die verschiedensten Momente angeschuldigt. Früher spielte zweifellos die Luft im Röntgenzimmer eine Rolle, zumal doch viele Menschen gegenüber nitrosen Gasen und den bei dunklen Entladungen entstehenden Ozonen sehr empfindlich sind. Davon kann heute im allgemeinen keine Rede mehr sein, weil der vollkommene Hochspannungs- und Strahlenschutz in hohen luftigen Bestrahlungsräumen eine Luftverschlechterung verhindert. Als weitere Ursache konnte die Aufladung des Patienten in Betracht kommen. Dadurch wird das elektrische Potential der Zellen zueinander gestört und die Nervenzentren gereizt. Am wichtigsten aber ist die Intoxikation durch Zerfallsprodukte, die durch die Absorption der Röntgenstrahlen im Organismus entstehen. Wenn die Zellen einer Geschwulst tödlich getroffen sind, so werden Giftstoffe frei, die der Organismus verarbeiten muß. Wenn eine größere besonders strahlenempfindliche Geschwulst bestrahlt wird, wie zum Beispiel ein großes Lymphosarkom, das innerhalb 24 Stunden verschwinden kann, — kann es doch vorkommen, daß dann Zustände wie bei einer schweren Fleischvergiftung auftreten. Bei manchen Krebsgeschwülsten ist dies allerdings nicht der Fall, weil ihre Resorption nicht so schnell vor sich geht. Es werden auch die gesunden Zellen in ihrem ganzen Stoffwechsel stark beeinflußt, so daß auch Toxine aus dem durchstrahlten gesunden Gebiet entstehen können.

Endlich sei noch die direkte Reizung des vegetativen Nervensystems genannt. Wir sprechen von einer Herabsetzung des Sympathicustonus.

Selbst bei gleichartigen Bestrahlungen und bei der Anwendung der gleichen Volumdosis kann bei verschiedenen Individuen die Strahlenintoxikation gänzlich verschieden sein. Hier spielen konstitutionelle Momente eine große Rolle. Wie bei jedem Erbrechen sind auch nervöse Einflüsse ausschlaggebend. Wenn eine Patientin das Röntgenzimmer betritt mit der vorgefaßten Meinung, daß sie erbrechen müsse, dann helfen alle Gegenmaßnahmen nichts.

Zahlreich wie die Ursachen des Röntgenkaters sind auch die Mittel, die zu seiner Behebung angewendet werden. Von besonderer Wichtigkeit ist die Allgemeinvorbereitung des Patienten, vor allem die peinliche Regelung der Darmtätigkeit.

Die Blutschädigung

Sowohl die Elemente des strömenden Blutes als auch die Blutbereitungsstätten weisen eine große Strahlenempfindlichkeit auf. Abhängig ist die Strahlenwirkung auf das Blut von der einverleibten Gesamtdosis, aber auch von der Menge der Strahlen, die in der Zeiteinheit angewendet wurden. Das bedeutet, daß sich eine mit großer Intensität vorgenommene Bestrahlung am Blutbild stärker geltend macht, als wenn die Dosis auf längere Zeit verteilt worden ist. Auch der Ort der Strahleneinwirkung ist maßgebend. Die Schädigung ist stärker, wenn besonders blutreiche Organe (Milz, Leber, Niere) im Bestrahlungsbereich liegen.

Es entspricht der richtigen ärztlichen Durchführung einer Bestrahlung, wenn auf die Blutschädigung weitgehend Rücksicht genommen wird. Man kann ruhig behaupten, daß selbst bei so großen Volumdosen, wie sie beim Mammakarzinom notwendig sind, keine dauernde Blutschädigung erfolgen muß. Im allgemeinen gleicht sich die Blutschädigung nach 6—8 Wochen wieder aus. Geschieht dies nicht, dann ist das für die Prognose ein schlechtes Zeichen. Natürlich können in ihrem Hämoglobin stark reduzierte Patienten die Blutschädigung viel schlechter überwinden als solche in gutem Allgemeinzustand. Patienten mit ausgesprochen schlechtem Blutbild zu bestrahlen, ist daher zwecklos!

7. Der Strahlenschutz

Die höheren im Röntgenbetrieb verwandten Spannungen verlangen einen besonderen Schutz für Patienten und Bedienungspersonal. Für die Röntgenstrahlen gilt die Forderung, daß der Körper des Patienten gegen ungewollte Strahlung geschützt werden muß. Das Bedienungspersonal — Ärzte, Assistentinnen und Techniker — müssen sich vor Röntgenstrahlen schützen, weil die dauernde Aufnahme auch kleinster Strahlenmengen schließlich zu Schädigungen des Organismus führt.

Ein vollkommener Hochspannungsschutz ist heute möglich. Die jetzt zur Verfügung stehenden Kabel, die den hochgespannten Strom zur Röntgenröhre führen, sind so konstruiert, daß selbst bei einer Spannung von 220000 Volt das Kabel angefaßt werden kann. Der zuführende Draht ist durch Gummi isoliert, die äußere Umhüllung geerdet. Durch diese Kabel sind auch dunkle Entladungen nicht mehr möglich. Die Luftverschlechterungen und damit die chemische „Gasvergiftung" für die im Röntgenbetrieb beschäftigten Personen fällt weg.

Die Röntgenröhre selbst ist bei modernen Anlagen in einer Haube eingeschlossen, die vollkommen strahlenundurchlässig ist und die ebenfalls einen Schutz gegen die Hochspannung aufweist. Der Austrittsort der Strahlen ist durch Tubusse so abgeschirmt, daß ein direkter Eintritt der Strahlen in den Körper stattfindet. Auch bei Fernbestrahlungen verwendet man lange Tubusse, um einen Austritt von Strahlen durch die Streuung in der Luft unmöglich zu machen. Es gibt allerdings einzelne Arten von Fernbestrahlungen, bei denen sich ein freier Durchgang der Strahlen durch die Luft nicht vermeiden läßt. Der Patient muß dann in breiter Umgebung des Einfallsfeldes mit Blei- oder Bleigummiplatten abgedeckt werden; so vermeidet man, daß die Luftstreustrahlung eine größere Körperpartie trifft.

Die Abschirmung von Luftstreustrahlen ist auch für das Bedienungspersonal von größter Wichtigkeit. Man macht deswegen auch die Platte des Bestrahlungstisches für Strahlen undurchlässig. Die den Körper des Patienten durchsetzenden Strahlen werden so vernichtet. Auch der Raumfrage wendet man heute eine ganz andere Aufmerksamkeit zu als früher. Die „Röntgenkabinette" aus der Zeit, da man mit dem gleichen Apparat Röntgentherapie und Röntgendiagnostik ausführte, sind verschwunden. Hohe luftige Räume sind die Forderung, die kleinen Schutzhäuser sind vor allem wegen der darin herrschenden schlechten Luft längst nicht mehr beliebt. Wenn auch die Abtrennung des Patienten vom Schalttisch durch eine strahlensichere Bleiwand die absolute Lösung des Strahlenschutzes darstellt, so verzichtet man doch heute auf eine solche Trennungswand zwischen Patienten und Schwester oder Arzt; denn das Gefühl des Alleinseins unter der großen Röntgenmaschine bedeutet für viele Patienten eine seelische Belastung. Wichtig ist, daß die Entfernung zwischen Patienten und technischem Personal möglichst groß gewählt wird, damit auf dem Wege weitestgehende Verringerung der wenigen aus dem Körper des Patienten austretenden Strahlen erfolgt.

Unter diesen Voraussetzungen gehören die Strahlenschäden an Arzt und Assistentinnen der Vergangenheit an, besonders dann, wenn durch geregelte Diensteinteilung dem Röntgenpersonal die Möglichkeit gegeben wird, durch Bewegung in freier Luft einen Ausgleich für die „Röntgenstrahlenluft" zu finden. Die heutige Organisation des Röntgenbetriebs verlangt auch, daß für eine besonders hochwertige Ernährung des Röntgenpersonals gesorgt wird.

8. Die Grenz- oder Bucky-Strahlen

Mit der Bezeichnung Grenzstrahlen hat Bucky das Gebiet derjenigen langwelligen Röntgenstrahlen belegt, deren Wellenlänge etwa von 1–4 ÅE (1 ÅE = 10^{-8} cm) reicht. Dieser Bereich ordnet sich im Verlauf des gesamten elektromagnetischen Spektrums zwischen das Gebiet der in der Röntgendiagnostik verwendeten Röntgenstrahlen, die Wellenlängen zwischen $^1/_2$ und $^1/_{10}$ ÅE haben, einerseits und das durch die Hochvakuumspektroskopie zugänglich gewordene Gebiet der längerwelligen Röntgenstrahlung oberhalb 4 ÅE ein. Die Grenzstrahlen stellen also nicht, wie man wohl vermuten könnte, ein Grenzgebiet zweier Strahlenarten etwa zwischen Röntgenstrahlen und Ultraviolett-Strahlen dar. Vielmehr wollte Bucky mit seiner Bezeichnung ausdrücken, daß die biologischen Wirkungen dieser Strahlen sich in vielem von den bei der kurzwelligen Röntgenstrahlung auftretenden unterscheiden.

Phot. Siemens-Reiniger-Werke A.-G.
Abb. 20. Grenzstrahlröhre

Zur Erzeugung so weicher Röntgenstrahlen kommt man mit verhältnismäßig niedrigen Spannungen aus. Man benötigt 4000–12 000 Volt, also Spannungen, die sich mit einem kleinen Transformator erzeugen lassen. Da die Bucky-Strahlen bereits von der normalen Glaswand der Röntgenröhre absorbiert werden, müssen die Röntgenröhren zur Erzeugung solcher Strahlen aus besonders wenig absorbierendem Glas hergestellt oder mit einem Fenster aus solchem Stoff versehen sein. Es sind daher für diesen Zweck von den verschiedenen Firmen, wie Siemens-Reiniger, C. H. F. Müller u. a. besondere Röhren mit einem sogenannten Lindemannfenster hergestellt worden. Das Lindemannglas ist ein Lithiumglas und hat gegenüber Röntgenstrahlen ein wesentlich geringeres Absorptionsvermögen als normales Glas. Die Abbildung 20 zeigt eine derartige Röhre. Man sieht das Lindemannfenster als kleine Vorwölbung am rechten Ende der Röhre. Es ist mit der normalen Glashülle verschmolzen und sehr empfindlich gegen mechanisch rauhe Behandlung. Auch ist es gegen die chemischen Einflüsse der Bestandteile der atmosphärischen Luft, wie Wasserdampf und sonstige der Luft beigemischte Gase, nicht unempfindlich, so daß es zum Schutz meist mit einer wenig absorbierenden Lackschicht überzogen wird.

Die Röntgenröhren zur Erzeugung der Grenzstrahlen werden heute ausschließlich mit Glühkathode versehen und lassen deshalb bei guter Kühlung der Anode den Strom nur in der zur Röntgenstrahlenerzeugung erforderlichen Rich-

tung von der Kathode zur Anode durchgehen. Dadurch wird die Verwendung eines Ventiles zur Gleichrichtung der an der Röntgenröhre liegenden Wechselspannung überflüssig. Die Schaltung für die Erzeugung der Grenzstrahlen ist deshalb, wie Abbildung 21 dartut, denkbar einfach. Die sekundärseitigen Pole des Hochspannungs-Transformators sind über ein Milliamperemeter direkt mit der Weichstrahlröhre verbunden. Der Glühfaden der Röhre wird durch einen primärseitig regelbaren hochspannungsisolierten Heiztransformator geheizt. Durch Veränderung der Heizung des Glühfadens ist die Milliamperezahl der Röntgenröhre regelbar. Ein primärseitig geschaltetes Voltmeter ermöglicht bei konstanter sekundärseitiger Milliamperezahl die Überwachung der Konstanz der Sekundärspannung.

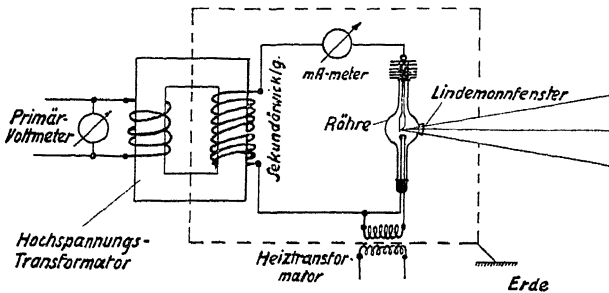



Abb. 21. Schaltschema der Grenzstrahlapparatur

Wegen der hohen Absorbierbarkeit der Grenzstrahlen und der geringen zu ihrer Erzeugung erforderlichen Spannungen ist es verhältnismäßig einfach, die Grenzstrahlapparatur den modernen Forderungen nach Hochspannungs- und Strahlenschutz anzupassen. Abbildung 22 zeigt eine vollständige Apparatur zur Krankenbehandlung mit Grenzstrahlen. Man sieht, wie außerordentlich einfach die ganze Anordnung ist. Auf dem Schalttisch, in dessen Gehäuse der Hochspannungs-Transformator untergebracht ist, befinden sich nur zwei Meßinstrumente mit ihren zugehörigen Regelorganen, das primärseitige Voltmeter und das Milliamperemeter. Mit dem Schalttisch verbunden erkennt man die Einstellvorrichtung mit der Röntgenröhre. Diese ist am oberen Ende in einer geerdeten Metallhohlkugel untergebracht. Auch das Strahlenaustrittsfenster ist gegen Berührung gesichert. Die ganze Anordnung ist sehr einfach und leicht zu handhaben.

Phot. Siemens-Reiniger-Werke A.-G.

Abb. 22.
Äußere Ansicht der Grenzstrahlapparatur

Für jedwede Strahlentherapie ist eine exakte Dosierung von ausschlaggebender Wichtigkeit. Da die Grenz-

strahlen Röntgenstrahlen sind, so können im Prinzip die gleichen Meß- und Dosierungsmethoden angewendet werden, wie sie sonst auch für Röntgenstrahlen üblich sind. Nur müssen die Methoden den Eigenschaften der Grenzstrahlen angepaßt werden.

Während die Röntgenstrahlen der Tiefentherapie, ja selbst diejenigen der Röntgendiagnostik viele Zentimeter Gewebe zu durchdringen vermögen, werden die Grenzstrahlen bereits durch wenige Millimeter Haut bzw. Gewebe auf einen kleinen Betrag ihrer Anfangsintensität geschwächt. Die Abbildung 23 gibt einen schematischen Vergleich der Schwächung einer mit 8 kV erzeugten Grenzstrahlung durch Hautgewebe mit der Schwächung von in der Röntgendiagnostik üblichen Strahlenqualitäten. Während die weichsten Diagnostikstrahlen durch 3 Millimeter Haut schlimmstenfalls um 8% herabgesetzt werden, hält die gleiche Hautschicht von der mit 8 kV erzeugten Grenzstrahlung 88% zurück. Selbst einige Zentimeter Luft absorbieren die Grenzstrahlung bereits erheblich. Ein weiterer Unterschied besteht darin, daß man bei den Grenzstrahlen den Streuprozeß vernachlässigen kann. Bei den Strahlen der Tiefentherapie sind wir gewohnt, die Intensität in irgendeinem Abstand vom Röntgenfokus aus der in

Abb. 23. Vergleich der Absorption verschiedener Strahlenqualitäten in Haut

einem bestimmten Fokusabstand gemessenen mit Hilfe des quadratischen Abstandsgesetzes zu berechnen. So einfach können wir bei der Grenzstrahlung nicht verfahren. Da sie durch Luft bereits geschwächt wird, so ergibt die wirkliche Messung der Intensität geringere Werte, als man sie nach dem quadratischen Abstandsgesetz berechnen würde. Diese Abweichung der Messung von den nach dem Quadratgesetz berechneten Werten soll Abbildung 24 veranschaulichen. Den berechneten, gestrichelt eingetragenen Werten ist dabei der in 6 Zentimeter Abstand gemessene Wert zugrunde gelegt. Wie man aus der Abbildung erkennt, ist die Abweichung bei der weicheren mit 8 kV erzeugten Strahlung im Verhältnis besonders groß. Für eine einwandfreie Dosierung ist also in jedem zur Bestrahlung verwandten Abstand eine Messung erforderlich.

Abb. 24. Abnahme der Strahlenintensität mit Zunahme des Fokus-Abstandes. Die gestrichelten Kurven geben an, wie der Abfall nach dem quadratischen Abstandsgesetz sein müßte

Das Meßverfahren selbst ist nun aber auch von dieser Abweichung betroffen. Wollte man etwa eine der in der Tiefentherapie üblichen Großkammern benutzen, so würde man deswegen nicht die richtigen Werte messen, weil infolge der Absorption in dem Luftvolumen der Meßstrecke beim Eintritt in die Kammer ein ganz anderer Intensitätswert vorliegt als beim Austritt. Man muß also bei der Messung der Grenzstrahlen nach dem Faßkammerprinzip möglichst kurze Meßstrecken verwenden und die an ihren Enden auftretenden Intensitätsunterschiede durch Rechnung berücksichtigen. Nun ist aber die Faßkammer für den praktischen Betrieb viel zu schwerfällig, als daß man sie hier verwenden könnte. Die Praxis braucht handlichere Instrumente; als solche kommen in Frage das Iontoquantimeter mit Kugel- oder Fingerhut-Kammer und das Wintz-Rumpsche Röntgenphotometer. Auch diese Instrumente sind wegen der hohen Absorbierbarkeit der Grenzstrahlen nicht ohne weiteres verwendbar. Beim Iontoquantimeter muß die Kammerwandung aus besonders dünnem Werkstoff hergestellt werden. Hierfür kommen in Frage dünne Goldschlägerhäute oder Zellophanschichten, die auf der Innenseite graphitiert werden. Bei der Verwendung des Wintz-Rumpschen Röntgenphotometers muß man dafür Sorge tragen, daß die den Leuchtschirm abdeckende Schutzhülle gegen den Röhrenfokus zu durch dünnes geschwärztes Seidenpapier ersetzt wird.

Um eine Grenzstrahlung wirklich so zu charakterisieren, daß man sie andernorts reproduzieren kann, muß man außer ihrer Intensität genau wie bei einer Tiefentherapiestrahlung Angaben über Härte und Homogenität machen. Diese beiden Angaben lassen sich am genauesten in einer Kurve der spektralen Intensitätsverteilung festlegen. Indessen ist dieses Verfahren für die Praxis zu umständlich, so daß man heute ausschließlich mit der sogenannten Halbwertschicht (HWS) arbeitet. Die Halbwertschicht ist diejenige Schicht irgendeines Stoffes, welche die Intensität der Strahlung auf die Hälfte herabsetzt. Als Filterstoffe dienen entweder Aluminium oder Zellophan. Da es sich bei den Grenzstrahlen um Halbwertschichten von der Größenordnung von 0,05 bis herab zu 0,007 Millimeter Al handelt, so ist eine genaue Messung der Dicke erforderlich; wie denn überhaupt die ganze Meßtechnik in der Grenzstrahlentherapie besondere Sorgfalt und Genauigkeit erfordert.

Zur genauen Dosierung der Grenzstrahlen ist es auch unbedingt erforderlich, daß die von der Röntgenröhre gelieferte Dosisleistung mit einem Meßinstrument ständig nachgeprüft wird. Es kommt vor, daß sich die Strahlenausbeute bereits nach Reinigung des Lindemannfensters der Röntgenröhre ändert. Außerdem haben die elektrischen Bedingungen starken Einfluß auf die Strahlenausbeute, so daß eine strenge Überwachung derselben während der Bestrahlung erforderlich ist.

Wenn man eine bestimmte Körperstelle bestrahlen will, muß man sich zunächst über den Fokusabstand, in dem bestrahlt werden soll, schlüssig werden. Ist das

geschehen, so wird, da das quadratische Gesetz für Grenzstrahlen nicht gilt, zunächst die Dosis in diesem Fokusabstand z. B. mit einem Fontoquantimeter mit Grenzstrahlkammer gemessen. Ist das geschehen, so ist nunmehr die betreffende Körperstelle aber auch ganz genau in diesen Fokusabstand zu bringen. Das geschieht mit Hilfe besonderer Einstell- und Zentriervorrichtungen. Die Dauer der Bestrahlung richtet sich nach der beabsichtigten Gesamtdosis. Während der Bestrahlungszeit müssen die elektrischen Bedingungen, nämlich die primäre Voltzahl und die sekundäre Milliamperezahl, peinlichst konstant gehalten werden.

Die Wirkung der Grenzstrahlen auf die menschliche Haut steht zwischen derjenigen der ultravioletten Strahlen und der der kürzerwelligen Röntgenstrahlen. Doch ist sie von beiderlei Reaktionsweisen deutlich verschieden. Das hängt mit der Wirkungstiefe zusammen. Einerseits dringen die Grenzstrahlen wesentlich tiefer ein als die ultravioletten Strahlen, andererseits reicht ihre Wirkung nicht so tief, wie die der kürzerwelligen Röntgenstrahlen. Ganz ungefährlich sind sie ebensowenig wie die ultravioletten Strahlen.

Bei den Grenzstrahlen ist wie bei den kurzwelligen Röntgenstrahlen zu vermeiden, daß die bestrahlte Haut vor oder nach der Bestrahlung von einer weiteren an sich vielleicht harmlosen Noxe getroffen wird. So schließt eine unmittelbare Vorbehandlung mit Wärme eine Bestrahlung mit Grenzstrahlen aus. Für die Behandlung der mit Grenzstrahlen behandelten Haut gelten ähnliche Vorschriften wie sie in der Röntgentherapie üblich sind. Das Endergebnis der Bestrahlung ist meist eine Bräunung des bestrahlten Feldes. Daher muß man bei der Bestrahlung sichtbarer Körperstellen kosmetische Rücksichten nehmen und dafür sorgen, daß wenigstens keine scharfen Feldgrenzen auftreten.

Man kann mit Grenzstrahlen einen in mehreren Phasen ablaufenden biologischen Reaktionsverlauf auslösen, der dem Ablauf der HED im Tiefentherapiegebiet ähnlich ist. Doch ist von verschiedener Seite darauf hingewiesen worden, daß die individuellen Schwankungen im Reaktionsverlauf bei Grenzstrahlen wesentlich größer sind, als wir sie von der Tiefentherapie her gewöhnt sind. Man kann daher schlecht einen solchen Ablauf als Dosierungsgrundlage aufstellen. Deshalb ist man in der Grenzstrahltherapie auf eine Dosierung nach Röntgeneinheiten angewiesen. Zum ungefähren Anhalt sei hier gesagt, daß der der HED entsprechende Ablauf mit etwa 260 r-Einheiten ausgelöst wird. Ein wesentliches Überschreiten dieser Zahl bedeutet aber durchaus noch keine Gefahr für die Haut. Es kommen gelegentlich 1500—2000 r-Einheiten zur Anwendung, ohne daß die Haut ernstlich in Mitleidenschaft gezogen würde. Ja, es ist bei Verzettelung von Dosen bis 15000 r berichtet worden. Mit so hohen Gesamtdosen muß man jedoch vor allem mit Rücksicht auf die Möglichkeit von Spätschädigungen sehr vorsichtig sein. Ebenso muß die größere Empfindlichkeit im Wachstum befindlicher Zellen beachtet werden.

Was nun die Art der Erkrankungen anlangt, die man mit Grenzstrahlen behan-

deln kann, so ist es klar, daß nur oberflächliche Affektionen in Betracht kommen. Es hat sich gezeigt, daß man fast alle Hautkrankheiten mit gutem Erfolg einer Grenzbestrahlung unterziehen kann. So ist z. B. über gute Erfolge bei Lupus, bei Hauttuberkulose, Ekzem, Psoriasis und vielen anderen Hautkrankheiten berichtet worden. Manchmal waren die Erfolge sogar überraschend gut. Derartige Einzelfälle dürfen aber nicht ohne weiteres verallgemeinert werden. Eine wirkliche Aussage über den Wert und Erfolg einer Behandlungsmethode kann man nur auf Grund einer hinreichenden und umfangreichen Statistik machen.

II. Die Kurzwellen-Therapie

Die Bezeichnung „Kurzwellen" stammt aus der drahtlosen Telegraphie. Diese Wellen wurden zunächst von Funktechnikern erforscht und benutzt. Ihre Wellenlänge — zwischen 3 und 30 Metern — liegt an der unteren Grenze der für Nachrichtenübermittlung gebräuchlichen Wellenlängen. Nur so ist der Ausdruck „kurze und ultrakurze Wellen" verständlich, zumal doch andere in der Medizin angewandte Wellen eine wesentlich kürzere Wellenlänge haben.

Als kurze physikalische Vorbemerkung sei darauf hingewiesen, daß die Wellenlänge der Ausdruck für das Verhältnis von Fortpflanzungsgeschwindigkeit zur Schwingungszahl pro Sekunde ist. Die Schwingungszahl pro Sekunde heißt „Frequenz", die Maßeinheit dafür ist „1 Hertz". Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrischen Wellen beträgt 300000 km in der Sekunde. Um beispielsweise eine Wellenlänge von 3 m zu erzeugen, ist ein Wechsel des Stromes von 100000000 in der Sekunde (100000 Kilohertz) (kHz) notwendig. $\left(3 = \frac{300000000}{100000000}\right)$. Es ist einleuchtend, daß eine Maschine niemals mit einer dieser Frequenz entsprechenden Drehzahl laufen könnte. Praktisch lassen sich mit Maschinen elektrische Wellen mit einer Wellenlänge von etwa 5 km und mehr erzeugen. Wohl gibt es Frequenz-Transformatoren, aber auch damit läßt sich niemals eine so kurze Wellenlänge erreichen. Wir benützen deshalb eine andere Anordnung: den Schwingungskreis.

Der Schwingungskreis

Ein Schwingungskreis (Abb. 25) besteht aus Selbstinduktion (Spule) und Kapazität (Kondensator). Wird in einem derartigen Kreis der Kondensator durch irgendeine äußere Stromquelle aufgeladen, so wird diese Ladung sich über die Induktivität der Spule ausbreiten. Dabei entsteht um die Spule ein magnetisches Feld. Der Kondensator ist entladen. Infolge der Trägheit des Stromes und des Magnetfeldes fließt der Strom aber weiter und lädt den Kondensator wieder auf. Diesmal aber in entgegengesetzter Richtung. Dabei entsteht im Kondensator ein elektrisches Feld. Wieder findet der gleiche Vorgang statt.

Dieses Hin- und Herpendeln zwischen elektrischer Energie (im Kondensator) und magnetischer Energie (in der Spule) würde beliebig lange dauern, wenn nicht durch die stets vorhandenen Widerstände ein Abklingen dieser Schwingungen bedingt wäre. Von der Größe des Kondensators und der Spule hängt nun die Schwingungszahl, d. h. die Eigenfrequenz des Systems ab. Mit wachsender Kapazität dauern die Lade- und Entladevorgänge immer länger, wir erhalten also eine langsamere Schwingung. Das gleiche gilt für die Größe der Selbstinduktion. Der Aufbau des zur Erzeugung der Selbstinduktionsspannung nötigen magnetischen Feldes dauert bei großer Spule länger, die Schwingungen werden also ebenfalls langsamer. Für medizinische Zwecke braucht man aber sehr rasche Schwingungen, Selbstinduktion und Kapazität müssen also äußerst klein sein. Aus praktischen Gründen kann man unter eine bestimmte Mindestgröße nicht heruntergehen, denn auch die Elektroden der Senderöhre bilden einen Kondensator. Und um eine entsprechende Leistung zu erzielen, muß die Röhre eben eine gewisse Größe haben. Auf diese Weise kann man keine kürzere Welle, als etwa 3 m bei brauchbarer Energie erreichen.

Abb. 25. Schwingungskreis

Wie oben dargestellt, klingen die Schwingungen rasch ab, wir müssen also dem Kondensator stets neue Energie zuführen, um ungedämpfte Schwingungen zu erhalten. Zum Aufladen muß aber der Kondensator von der Spule abgeschaltet und an die Spannungsquelle gelegt werden und nach vollzogener Ladung wieder an die Spule. Dieser Vorgang, der bei der hier benötigten Frequenz 100 millionenmal in der Sekunde stattfinden muß, ist nur mittels eines trägheitslosen Schalters möglich, wie er im Dreielektrodenrohr zur Verfügung steht.

Das Dreielektrodenrohr

Diese Erfindung verdanken wir dem Amerikaner Lee de Forest. Im Jahre 1906 gelang es ihm durch Einfügen des sogenannten Gitters in eine Geißlersche Röhre diese für die Technik nutzbar zu machen. Diese Röhre wurde damit für die Weiterentwicklung der drahtlosen Telegraphie von höchster Bedeutung und machte die drahtlose Telephonie im heutigen Umfange überhaupt erst möglich. Die erste Kathodenstrahlröhre dieser Art wurde von dem österreichischen Ingenieur von Lieben konstruiert, der sie zunächst als Telephon-Relais verwenden wollte.

Abb. 26. Dreielektrodenrohr (Schemazeichnung)

In einem evakuierten Glaskolben (Abb. 26) ist ein Heizfaden angebracht, der, wenn er zum Glühen gebracht wird, Elektronen aussendet. Dieser Kathode gegenüber befindet sich die Anode, die positive Spannung erhält, so daß ein

Strom von der Kathode zur Anode fließt. Der Schwarm von Elektronen muß unterwegs die dritte Elektrode, das Gitter, passieren. Gibt man dem Gitter eine negative Ladung, so wird der Strom geschwächt oder ganz unterdrückt, der Schalter ist also geöffnet. Dagegen wird der Strom fließen bzw. er wird sogar verstärkt, wenn das Gitter eine positive Ladung erhält, der Schalter ist also geschlossen. Führt man dem Gitter eine Wechselspannung zu, beispielsweise eine Tonfrequenz, so haben wir das Wesen des Verstärkers vor uns, wie er ja heute in der Radiotechnik in größtem Maße angewendet wird.

Abb. 27. Rückkopplungsschaltung nach Meißner

Mit diesen Hilfsmitteln gelang es im Jahre 1913 Meißner, die Schaltungsanordnung zu schaffen, auf der sämtliche Röhrensender beruhen (Abb. 27).

Der Gitterkreis ist über eine Spule geschlossen und im Anodenkreis liegt unser schwingungsfähiges System. Wird nun der Anodenkreis geschlossen, so bewirkt der Stromstoß, daß im Generatorkreis Schwingungen auftreten. Diese würden sehr rasch auf Null abklingen, wenn Generatorkreis und Gitterkreis nicht miteinander gekoppelt wären. Durch diese Kopplung werden Ladungsänderungen des Gitters bewirkt und durch diese Schwankungen im Gitterkreis werden auf Grund der Verstärkereigenschaft der Röhre im Anodenkreis Schwingungen von gleicher Frequenz aber höherer Stärke (Amplitude) erzeugt. Die Folge wird sein, daß die Schwingungen im Generatorkreis nicht abklingen, sondern durch den Gitterkreis verstärkt werden. Das bewirkt wieder Vergrößerung der Schwankungen im Gitterkreis und damit verstärkte Ladungen und Entladungen des Gitters. Es findet also ein Aufschaukeln der Amplitude bis zu einem Maximum statt, das durch die Größe der Röhre bedingt ist. Diese Schaltanordnung stellt die Rückkopplung dar.

Der Sekundärkreis (Behandlungskreis)

Die Schwingungen des direkt an der Röhre liegenden Primärkreises werden auf einen zweiten Kreis induziert, der natürlich ebenfalls aus Spule und Kondensator besteht und in dessen Kondensator die Behandlung stattfindet. Wir haben dadurch auch den Vorteil gewonnen, daß der Patientenkreis in keinerlei leitender Beziehung zu der etwa 4000 Volt betragenden Anodenspannung steht, daß also jede Gefahr vermieden ist.

Sender mit Funkenstrecke

Bis zur Erfindung des Dreielektrodenrohres durch den Amerikaner Lee de Forest benutzte man die Funkenstrecke wie sie auch Hertz zu seinen grundlegenden Versuchen verwandte. Die Schaltanordnung zeigt die Abbildung 28. Der Vorgang ist dabei folgender: Durch den speisenden Wechselstrom wird der Kondensator aufgeladen. Ist die Spannung so groß, daß der Luftspalt in der Funkenstrecke überschlagen werden kann, so setzt der Funkenübergang ein. Der Kondensator entlädt sich über die Spule, und wir bekommen den bekannten Vorgang der Schwingung. Allmählich nehmen die Schwingungen an Stärke ab, bis der Kondensator von neuem aufgeladen ist und sich derselbe Vorgang wiederholt. Damit erhalten wir gedämpfte Schwingungen, im Gegensatz zu den ungedämpften, wie sie ein Röhrensender liefert (Abb. 29). Beide Systeme finden in der Praxis Anwendung, doch ist der Röhrensender an Leistung dem Sender mit Funkenstrecke überlegen.

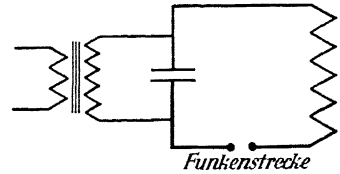



Abb. 28. Schaltanordnung eines Senders mit Funkenstrecke

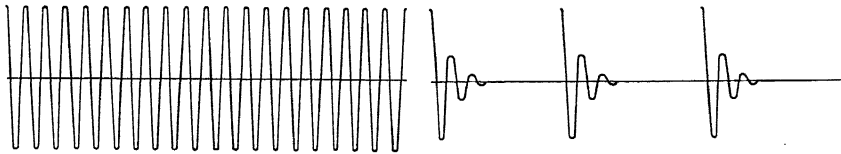



Abb. 29. Ungedämpfte und gedämpfte Schwingungen

Das zwischen den Platten eines Kondensators liegende Medium wird Dielektrikum genannt, wir haben es also bei der Kurzwellenbehandlung mit dielektrischen Vorgängen zu tun.

Das Dielektrikum

Die Wirkung, die wir im Dielektrikum erwarten dürfen, ist durch dielektrische Verluste bedingt, denen folgender Vorgang zugrunde liegt:

Die Teilchen des organischen Dielektrikums besitzen elektrische Dipole, d. h. bei ihnen sind — wie die magnetischen Mengen bei einer Magnetnadel — gleich große positive und negative Ladungen in kurzem Abstand nebeneinander gelagert. Ebenso wie ein Magnetfeld die Magnetnadel in seine Richtung einzustellen versucht, so tut dies das elektrische Feld mit den polaren Körpern, die damit zu ständiger Richtungsänderung gezwungen sind. Dieses Umklappen, das im Rhythmus der angelegten Frequenz erfolgen will, geschieht aber nicht reibungslos, es wird Energie verbraucht und in Wärme umgesetzt. Diese Verluste und damit die Wirkungen nehmen aber nur dann maximale Werte an, wenn Wellenlänge,

Leitfähigkeit und Dielektrizitätskonstante in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen.

Bei der Wirkung muß es sich nicht nur um Wärme handeln, sondern es ist auch möglich, daß die Moleküle in ihrem chemischen Gefüge gestört werden, daß also eine spezifische Wellenwirkung möglich ist. Doch steht dem entgegen, daß die Quantenenergie bei Wellenlängen von Metern hierzu noch gering ist.

Aus diesen Überlegungen geht nun folgendes hervor: Die einzelnen Teile des menschlichen Organismus, die sich nach Leitfähigkeit und Dielektrizitätskonstante voneinander unterscheiden, werden sich verschieden stark erwärmen. Außerdem wird sich das Verhältnis, wie sich die einzelnen Teile erwärmen, bei Änderung der Wellenlänge fortlaufend verschieben. Und ferner: Für jedes Gewebe muß sich eine Wellenlänge finden, bei der ein Maximum an Wirkung auftritt. In Wirklichkeit werden die Verhältnisse dadurch komplizierter sein, daß sich jedenfalls schon Zellkern und Protoplasma verschieden verhalten werden.

Das Neue gegenüber der Diathermie liegt also darin, daß es möglich ist, an jeder Stelle und in jeder Tiefe eine Wirkung hervorzubringen. Während bei der Diathermie die Wärme an den Rändern am größten ist, ist mit der Kurzwellenbehandlung eine gleichbleibende Wärme durch das ganze (homogene) Medium zu erzielen. Durch Änderung des Elektrodenabstandes oder durch entsprechende Formgebung läßt sich die Wirkung auf die eine oder andere Seite hin verschieben.

Dies waren die physikalischen Grundlagen, mit denen die Funktechniker arbeiteten. Besondere Verdienste um die Erforschung der kurzen Wellen erwarb sich Prof. Esau in Jena. Er war es auch, der die merkwürdige Tatsache beobachtete, daß Mücken, die zufällig zwischen die Platten eines Kondensators seines Senders gerieten, tot zu Boden fielen. Auf diese Beobachtung baute nun Schliephake auf und führte die Kurzwellen in die Medizin ein. Ihm gebührt der Ruhm, die Methode bis zur Reife für die Praxis entwickelt zu haben.

Nach einigen tastenden tierexperimentellen Vorversuchen, wobei festgestellt wurde, daß die Tiere an Überhitzung, also an Wärmewirkung zugrunde gingen, wandte Schliephake die Kurzwellen im Selbstversuch an. Er war an einem schmerzhaften Nasenfurunkel erkrankt und setzte sich nun mehrmals dem Kondensatorfeld aus. Wirklich traf der gehoffte Erfolg ein: in überraschend kurzer Zeit bildete sich der Furunkel vollständig zurück.

Die hervorstechendste Beobachtung bei diesem Selbstversuch war die Wärmeempfindung. Wesentlich dabei war aber, daß die Wärme in durchaus erträglichen Grenzen gehalten werden konnte. Durch diesen Erfolg ermutigt, wurden nun eine große Reihe entzündlicher Erkrankungen mit Kurzwellen behandelt. Immer wieder wurde der rasche Heilverlauf beobachtet. Zunächst beschränkte man sich auf oberflächliche Entzündungen, um den Ablauf in möglichst guter Beobachtung zu halten. Schließlich ging man auch zur Behandlung von Entzündungen, die

im Innern des Körpers vorhanden waren, über und hatte damit das Hauptanwendungsgebiet der Kurzwellentherapie gefunden.

Daneben wurden durch experimentelle Untersuchungen, an denen sich eine Vielzahl von Forschern beteiligte, weitere für die Therapie wichtige Erkenntnisse gefunden. Das Wesentliche an der Kurzwellenbehandlung ist ja, daß man die Energie praktisch an jede Stelle des Körpers bringen kann. Mit keiner anderen Methode war es bisher möglich, in der Tiefe des Körpers, in einem bestimmten Gebiet, annähernd so hohe Temperaturen zu erzielen, wie an der Oberfläche. Auch der Diathermiestrom ist dazu nicht in der Lage, da er sich die Bahnen bester Leitfähigkeit sucht, also im wesentlichen nur der Blutbahn folgt. Bei der praktischen Anwendung hatte sich zudem gezeigt, daß es gar nicht notwendig war, sehr hohe Temperaturen zu erzeugen, auch bei gelinder eben angenehm fühlbarer Wärme trat der gute Erfolg ein. Dies legte den Gedanken nahe, daß neben der Wärmewirkung auch noch eine spezifische Wirkung der kurzen Wellen vorhanden sein müsse. Man untersuchte nun vor allen Dingen Bakterien, die durch eine Kühleinrichtung auf einer bestimmten Temperatur gehalten wurden. Dabei ergab sich, daß auch dann eine Schädigung, ja sogar ein Absterben erreicht werden kann. Besonders von der Wiener Schule wurden derartige Versuche durchgeführt, sowie die Abhängigkeit der Wirkung von der Wellenlänge untersucht. Danach sollen bestimmte Bakterien auf eine bestimmte Wellenlänge ansprechen. Diese Untersuchungen wurden von anderer Seite wiederholt, ohne aber immer zu diesem Ergebnis zu führen. Die Forschungen in dieser Richtung, ob wirklich neben der Wärmewirkung eine spezifische Wirkung der kurzen Wellen vorhanden ist, sind noch im Gang. Im gegenwärtigen Zeitpunkt werden beide Meinungen verfochten. Aus der Überlegung heraus, daß die Moleküle im Kurzwellenfeld die Richtungsänderung des elektrischen Feldes im Rhythmus der angelegten Frequenz mitmachen müssen, wäre eine Veränderung des Moleküls denkbar. Doch wird von physikalischer Seite entgegengehalten, daß die Quantenenergie bei Wellenlängen in der Größenordnung von Metern hierfür noch zu gering ist.

Fest steht, daß die Kurzwellendurchflutung in dem behandelten Gebiet eine starke Erweiterung der Blutgefäße bewirkt. Das erkrankte Gewebe wird also reichlich mit Blut versehen, dadurch werden Abwehrstoffe in großer Menge hintransportiert, die die Heilung bewirken können. Dabei handelt es sich um eine sogenannte aktive Hyperämie, d. h. die stärkere Blutansammlung geschieht durch Erweiterung der zuführenden Arterien. Im Gegensatz dazu spricht man von einer passiven Hyperämie, wenn diese durch Verhinderung des Abflusses hervorgerufen wird. Auch die letztere schafft günstige Heilungsbedingungen und wird deshalb praktisch angewandt. Doch ist es einleuchtend, daß die aktive Hyperämie jener überlegen ist.

Das Hauptanwendungsgebiet der Kurzwellentherapie ist bis heute die Be-

handlung entzündlicher Erkrankungen geblieben. Dadurch hat sie Eingang fast in jede Sparte der praktischen Medizin gefunden. Der Fortschritt liegt neben der für Arzt und Patienten angenehmen Behandlungsart, in der Abkürzung der Behandlungsdauer.

In der inneren Medizin finden Kurzwellen vielfache Anwendung. So sieht man günstige Erfolge beispielsweise bei der Rippenfellentzündung, bei der es zu großen Eiteransammlungen kommen kann. Gelegentlich sind dabei die Patienten in so schlechtem Allgemeinzustand, daß an eine Operation nicht mehr zu denken ist. In letzter Zeit hat man festgestellt, daß auch die Lungenentzündung der Kurzwellenbehandlung zugänglich ist. Ja, selbst Tuberkulose wird günstig beeinflußt. Die Erfahrungen darüber sind noch verhältnismäßig spärlich. Es ist dies erklärlich, da man in der Kurzwellenbehandlung zunächst eine verbesserte Diathermie sieht. Und für Diathermie sind akute Entzündungen völlig ungeeignet. Man ist in der Anwendung natürlich äußerst vorsichtig und beschränkt sich vielfach auf verzweifelte Fälle. Aber gerade in solchen Fällen kann eine neue Methode zeigen, was sie zu leisten imstande ist. Ein äußerst wichtiges Gebiet ist ferner die große Anzahl rheumatischer Erkrankungen. Hierbei leistet die Kurzwellenbehandlung erstaunliches. Ebenso in der Behandlung von Nervenschmerzen. In der Behandlung innersekretorischer Drüsen ist ein vielversprechender Anfang gemacht worden.

Weite Verbreitung haben die Kurzwellen auch in der Chirurgie gefunden. Ein besonders dankbares Gebiet sind hier die Erkrankungen der Gelenke und besonders die schon erwähnten Furunkel und Karbunkel. Narbenbeschwerden trotzen oft jeder anderen Behandlung und erneute Operationen bringen nur in seltenen Fällen den gewünschten Erfolg.

Ein großer Teil aller Frauenkrankheiten sind entzündlichen Ursprungs. Die Umgebung der Gebärmutter sowie das Bauchfell des Beckens sind ein idealer Nährboden für eingedrungene Keime. Hier ist von der Kurzwellentherapie viel zu erwarten, denn hier handelt es sich um Entzündungen, die in der Tiefe des Körpers liegen. Der Erfolg ist nicht ausgeblieben. Vor allem gelingt es, eine Abkürzung der sonst sehr langen Behandlungszeit zu erzielen. In manchen Fällen kann man auch die Patientinnen vor einer Operation bewahren. Zu den entzündlichen Erkrankungen, die der Frauenarzt zu behandeln hat, gehört auch die Brustdrüsenentzündung. Auch hier kann die Kurzwellenbehandlung äußerst erfolgreich sein.

Auch bei Hals-, Nasen- und Ohrenkrankheiten leisten die Kurzwellen sehr gute Dienste. Eiterungen der Nebenhöhlen sind ein dankbares Anwendungsgebiet, ebenso die Mittelohrentzündung.

Die Zahnheilkunde verwendet Kurzwellen zur Behandlung von Paradentosen und Granulomen, wobei es sogar schon gelungen ist, die jeweils günstige Wellenlänge zu finden.

Von den Nervenkrankheiten sind außer den schon erwähnten Neuralgien die Neuritiden ein dankbares Anwendungsgebiet. Für den Psychiater ist seit Wagner-Jauregg der günstige Einfluß von Fieber auf die progressive Paralyse bekannt. Die künstlichen Fieberanfälle werden durch Malariaimpfungen hervorgerufen. Diese Behandlung birgt insofern eine gewisse Gefahr in sich, als man das Fieber nicht beliebig eintreten und vergehen lassen kann. Bringt man den ganzen Körper in ein Kurzwellenfeld, so gelingt es unschwer, Temperaturen großer Höhe zu erzeugen, und man hat den Vorteil jederzeit abschalten zu können. Im Verlauf der Forschungen hat sich herausgestellt, daß es in vielen Fällen genügt, nur den Kopf des Patienten den kurzen Wellen auszusetzen. Es ist dies eine ungleich schonendere Behandlung.

Von den Hautkrankheiten ist außer den schon erwähnten Furunkeln und Karbunkeln eine weitere große Anzahl entzündlichen Ursprungs. Besonders bei den oft sehr hartnäckigen Ekzemen sind die Kurzwellen wirkungsvoll. Von den Gonokokken, den Erregern der Gonorrhoe, ist bekannt, daß sie sehr temperaturempfindlich sind. Man verwendet daher, ähnlich wie bei der Paralyse, bei gonorrhoischen Erkrankungen, die der direkten Behandlung mit desinfizierenden Mitteln nicht zugänglich sind, eine Fieberbehandlung. Auch diese kann man mit vollem Erfolg durch Kurzwellen ersetzen.

Das umstrittenste Gebiet für die Kurzwellenbehandlung ist die Behandlung des Krebses. Reiter gibt an, mit der Wellenlänge von 3,40 m im Tierversuch eine bösartige Geschwulst zur Rückbildung gebracht zu haben. Alle Versuche, dieses Ergebnis auf Krebs beim Menschen zu übertragen, sind aber bisher fehlgeschlagen. Auch hier wird erst die Zukunft die volle Klärung bringen müssen.

Zusammengefaßt läßt sich sagen, daß die Kurzwellenbehandlung eine wertvolle Bereicherung der physikalischen Therapie darstellt. Das Anwendungsgebiet ist so groß, daß heute sicher noch nicht alle Möglichkeiten erschöpft sind, wenn auch teilweise über das Ziel hinausgeschossen wurde. Zu ihrer Anwendung ist aber eine gründliche Kenntnis der physikalischen Grundlagen und eine strenge Auswahl geeigneter Erkrankungen erforderlich. In der Hand des erfahrenen Arztes kann sie aber Wertvolles leisten.

III. Die Ultraschallwellen

Seit einigen Jahren wird versucht, der Medizin eine neue Art von Strahlen nutzbar zu machen: die Ultraschallwellen. Es sind dies mechanische Schwingungen wie ein hörbarer Ton, jedoch von so hoher Frequenz, daß sie mit dem Sinnesorgan Ohr nicht mehr wahrnehmbar sind.

Das menschliche Ohr kann mechanische Schwingungen von etwa 18 Wechsel pro Sekunde bis zu 20000 als Laut wahrnehmen. Auf Schwingungen höherer

Frequenz spricht es nicht mehr an. Derartige Schwingungen von etwa 40 Kiloherz wurden während des Krieges von dem französischen Physiker Langevin zur Auffindung deutscher Unterseeboote benützt. Nach dem Kriege wurden diese Versuche zu Echoloten, Eisbergpeilern usw. ausgebaut. Gleichzeitig war aber auch damit der Anstoß zur Untersuchung der biologischen Wirkung des Ultraschalls gegeben, da man die merkwürdige Erscheinung beobachtet hatte, daß kleine Fische, die in den Ultraschallstrahl geraten waren, getötet wurden.

Zur Erzeugung der Ultraschallwellen bedient man sich, je nach der gewünschten Frequenz, verschiedener Methoden. Für niedrige Frequenzen von etwa 20000 bis 450000 Herz kann man einen Eisenstab, der eine Membran trägt, elektrisch erregen. Er führt Longitudinalschwingungen aus, wenn sein Magnetismus periodisch geschwächt und gestärkt wird. Für langsame Schwingungen kann der Stab verhältnismäßig groß sein, für rasche Schwingungen muß er dagegen sehr klein sein. Da man unter eine bestimmte Größe nicht herabgehen kann, benötigt man zur Erzeugung höchster Frequenzen ein anderes Hilfsmittel.

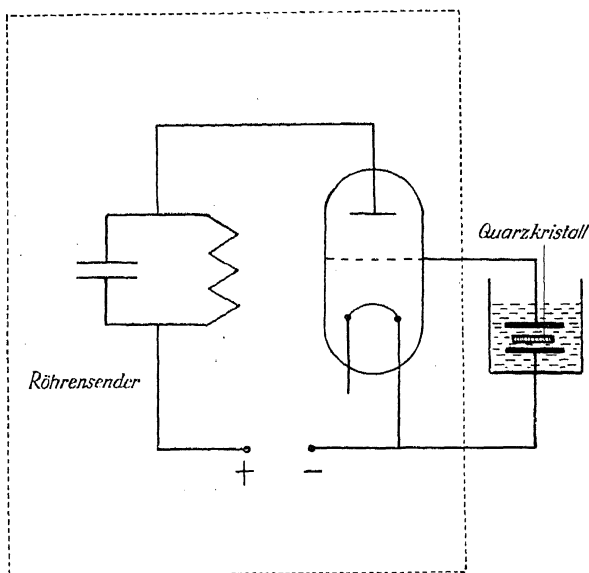



Abb. 30. Schaltschema eines Ultraschallsenders

Dies steht uns im Piëzokristall zur Verfügung. Cady fand nämlich, daß eine Platte aus Quarz, die in ein elektrisches Wechselfeld gebracht wurde, zu mechanischen Schwingungen erregt werden kann. Diese Erscheinung, der piëzoelektrische Effekt tritt jedoch nur auf, wenn das betreffende Quarzstück nach bestimmten Gesichtspunkten aus dem Rohquarz herausgeschnitten wird. Stehen Länge, Breite und Dicke der Quarzplatte in einem bestimmten Verhältnis zueinander, so hat der Quarz eine Eigenschwingung, die angeregt wird, wenn man ihn in ein elektrisches Feld derselben Frequenz bringt. Dasselbe Prinzip verwendet man heutzutage in ausgedehntem Maße bei der Steuerung von Sendern drahtloser Stationen.

Da die Ultraschallwellen in Luft sehr stark absorbiert werden, bedient man sich zu Untersuchungen über die Wirkung meist anderer Medien, hauptsächlich Öl. Oberhalb des Quarzes entsteht in dem Öl eine lebhafte Flüssigkeitsbewegung, die bei höheren Spannungen als lebhafte Ölfontäne von einigen Zentimetern

Höhe zu sehen ist. In diese Ölfontäne bringt man die zu untersuchenden Präparate hinein.

Die Untersuchungen über die Wirkung der Ultraschallwellen wurden besonders von den Amerikanern Wood und Loomis gefördert. Vor allem wurde von ihnen die chemische Wirkung untersucht (Oxydationsvorgänge, Kristallisationsförderungen, Emulsionsbildung).

Die einzige Anwendung in der praktischen Medizin ist bisher nur die Behandlung von einigen Ohrenleiden. Unter dem Eindruck, daß es sich um Schallwellen handelt, war dieser Gedanke naheliegend. Bei eitriger Mittelohrentzündung sollen sich günstige Erfolge erzielen lassen, vor allen Dingen soll eine Verbesserung der Hörfähigkeit erreicht werden.

Versuchsapparatur der Siemens-Reiniger-Werke A.-G.
Abb. 31. Laboratoriumsmäßiger Aufbau eines Ultraschallsenders. In dem weißen Gehäuse befindet sich ein Röhrensender, das davorstehende Glasgefäß birgt den Quarz und ist mit Öl gefüllt

Eine wichtige Entdeckung machte bei seinen Untersuchungen Boyle: er bemerkte, daß sich im Zuge des Schallstrahls bei genügender Energie Bläschen ausbilden, die sich in den Knotenpunkten ansammeln. Auf diese Bläschenbildung ist wahrscheinlich die biologische Wirkung zurückzuführen, da in den die Zelle unmittelbar umgebenden Medium eine Zerstörung der Plasmamembran der Zelle eintritt.

Eine Reihe weiterer Forscher haben bisher einzelne Versuche über die Wirkung der Ultraschallwellen unternommen. Sie sind aber alle noch nicht so weit gediehen, um in die Praxis Eingang zu finden. Daß die Ultraschallwellen biologisch wirksam sind, ist von den Untersuchern übereinstimmend bezeugt worden. Erst die weitere Forschung wird feststellen müssen, ob die Ultraschallwellen zur praktischen Anwendung geeignet sind.

Die bioklimatische Bedeutung der Strahlen

Von Dozent Dr. med. H. Pfleiderer

Vorbemerkung

Über die Bezeichnung der einzelnen Spektralgebiete in den folgenden Abschnitten ist eine Bemerkung angezeigt. Wenn von Wärmestrahlung gesprochen wird, so ist damit nicht ein bestimmter Spektralbezirk gemeint (etwa der ultrarote), sondern das Wärmeäquivalent der gesamten vorhandenen Strahlung, zu dem allerdings die kurzwelligen Bezirke (Blau-Violett-Ultraviolett) nur wenig beisteuern. Einen Überblick über Grenzen und Bezeichnung einzelner Bezirke gibt Tab. I.

Tabelle I

Wellenlängen	Bezeichnung	
296 bis 313 mμ	Erythemwirksames Sonnenultraviolett, Dornostrahlung, UVB	
313 bis 400 mμ	langwelliges Ultraviolett, UVA	
400 bis 450 mμ	Violett	
450 bis 490 mμ	Indigo	
490 bis 530 mμ	Blau	sichtbares Licht
530 bis 560 mμ	Grün	sichtbares Licht
560 bis 600 mμ	Gelb	sichtbares Licht
600 bis 650 mμ	Orange	
650 bis 760 mμ	Rot	
0,76 bis 5,0 μ	inneres Ultrarot	
5,0 bis 50,0 μ	äußeres Ultrarot (Abstrahlungsgebiet)	

Fensterglas läßt die Strahlen bis herab zur Wellenlänge 320 mμ hindurchtreten.

1. Die Geschichte der Heliotherapie

Die Anwendung der von der Sonne ausgesandten Strahlung zu Heilzwecken ist uralt. Die Kenntnis der Heilkraft der Sonne fand ihren Niederschlag zunächst in der kultischen Verehrung von Sonnengottheiten (Rha, Mithras, Odin). Herodot berichtet in seinem 431 v. Chr. verfaßten Geschichtswerk von Beobachtungen und Angaben über Strahlenwirkungen. Auf seiner ägyptischen Reise besichtigt er die aus der Schlacht von Pelusium im Jahre 525 v. Chr. stammenden

Schädel der gefallenen Perser und Ägypter und findet einen bedeutenden Unterschied in der Härte der ägyptischen und persischen Schädel. Die auffallende Weichheit der letzteren führt er auf die Lebensweise der Perser zurück, die Sonnenbestrahlungen weitgehend vermieden. Oribasius, ein im 2. Jahrhundert vor Christus in Rom lebender griechischer Arzt gibt bereits als Anwendungsgebiet für die Heliotherapie die Muskelschwäche an und erteilt Ratschläge für die Technik der Besonnung. Assyrer, Griechen und Römer bauten gut ausgestattete Solarien. Hippokrates von Kos, der erste Kliniker (geb. 460 v. Chr.) empfiehlt in seinen Schriften „über die Lebensweise" und „über Luft, Wasser und Bodenbeschaffenheit", deren Titel sehr modern anmuten, die Anwendung des Luft- und Sonnenbades zur allgemeinen Gesundung, besonders aber zur Wundbehandlung und bei Knochenbrüchen. Durch den im 2. Jahrhundert n. Chr. lebenden römischen Arzt Galen wird die Sonnenbehandlung bis zu Paracelsus' Zeiten (Anfang des 16. Jahrhunderts) ein fester Bestandteil der ärztlichen Heilkunst. Im Mittelalter erfolgte dann jedoch ein Niedergang in der Anwendung der natürlichen Heilmittel im Zusammenhang mit dem Einsetzen einer naturabgewandten unhygienischen Lebensweise. Lange Zeit hindurch wird das Sonnenlicht nur ganz vereinzelt in der Medizin angewandt, so im 14. Jahrhundert bei der Pestbekämpfung im Mittelmeergebiet, wo die Quarantäneinsassen für 40 Tage dem Wind und der Sonne ausgesetzt wurden. Im 18. Jahrhundert wurden in Frankreich vereinzelt Geschwüre mit Sonnenbestrahlung behandelt.

Erst zu Beginn des 19. Jahrhunderts setzte in Deutschland die wissenschaftliche Bearbeitung der Lichtwirkungen ein. Den Auftakt bildete eine 1796 von der Universität Göttingen ausgeschriebene Preisaufgabe: „Quaenam sit lucis in corpus humanum virium efficatia, tum noxia tum praeter eam partem, quam in visu agit, utilis ac salutaris".

Eine Reihe von Indikationen und Gegenindikationen der Sonnenbehandlung veröffentlicht der Jenenser Professor Loebel im Jahre 1815. Er empfiehlt die Sonnenanwendung bei allen „Übelseinsformen, in denen das Vegetative des Organismus gelitten" habe, bei kalten Extremitäten, Schwäche und Untätigkeit des lymphatischen Systems, bei chronischer Hautwassersucht, Gicht, Rheuma, Darmerkrankungen, Gallenanfällen, chronischen Magenkrämpfen, Diarrhöe und bei einer Anzahl nervöser Störungen. Als Gegenindikationen gibt er an: heftige Entzündungen, entzündliche Lungenaffektionen, Blutspeien, Blutflüsse, Kongestionen und gastrische Störungen.

In der Mitte des 19. Jahrhunderts sind da und dort Ansätze zur Heliotherapie zu finden, in Frankreich bei der Lyoner Schule bezüglich der Knochen- und Gelenkerkrankungen, in der Schweiz bei dem Laienbehandler Rickli, der eine Konstitutionstherapie mit großen Erfolgen anwendet. In gleicher Zeit beginnt Hermann Brehmer in Görbersdorf in Schlesien mit der klimatisch-diätetischen Heilstättenbehandlung der Tuberkulose und erzielt damit vorzügliche Erfolge. Ende

dieses Jahrhunderts (1893) beginnt die moderne Strahlentherapie mit den Arbeiten des dänischen Forschers Finsen, der zum ersten Male dem ultravioletten Bezirk besondere Bedeutung beimißt.

Neun Jahre später beginnt O. Bernhard in der Schweiz mit der Heliotherapie des Hochgebirges bei der Wundbehandlung und der Behandlung der außerhalb der Lungen lokalisierten Tuberkulose, dem ein Jahr später (1903) Rollier in Leysin nachfolgt. Später folgen Heilstätten in Deutschland, im Flachland, an den Seeküsten und im Mittelgebirge.

Zugleich setzt die wissenschaftliche Erforschung der physikalisch-meteorologischen Verhältnisse ein, die für das Hochgebirge von Carl Dorno in umfassender Weise durchgeführt wurde. Dorno ist durch seine weitangelegten Forschungen zum Begründer der modernen Bioklimatik geworden und hat über seine epochemachenden Forschungen hinaus den Anstoß zu medizinischen Klimaforschungen auf der ganzen Welt gegeben.

2. Die Lebensnotwendigkeit der Strahlen

Für die folgenden Betrachtungen ist es notwendig, über die Frage Klarheit zu gewinnen, wie weit die natürliche Strahlung für das Leben auf der Erde notwendig ist.

„Ohne Licht kein Leben" heißt ein alter Satz. Die Bedeutung der Sonnenstrahlung für das Leben ist schon frühzeitig erkannt worden, wie der verbreitete Sonnenkult erkennen läßt. Assyrer, Babylonier, die alten Ägypter und die Inkas haben die Sonne unter die religiösen Symbole aufgenommen; auch die alten Germanen haben die steigende Sonne als „Heilgott" verehrt. Im klassischen Altertum war die Wichtigkeit des Sonnenlichtes wohlbekannt. Jedoch gab es Völker und Zeiten, die der Strahlung weniger Wert beilegten, und es gibt ferner Gegenden der Erde, die an dem kostbaren Gut der Sonnenstrahlung wenig teilhaben. Einzelne Individuen verbringen einen großen Teil ihres Lebens ohne jeglichen Strahlengenuß. Die strahlenreichsten Gegenden der Erde sind keineswegs diejenigen mit der am höchsten entwickelten Menschenrasse. Viele Tiere leben fast ganz ohne Sonnenstrahlung, sei es freiwillig oder auch unfreiwillig wie z. B. Stalltiere oder Grubenpferde. Letztere leben jahrelang und jahrzehntelang unter Bedingungen, die für ihre Art ganz unnatürlich sind, und doch sind sie bei guter Pflege sehr leistungsfähig. Während des Polarwinters fehlt bekanntlich monatelang die Sonnenstrahlung. Man hat bei der Überwinterung von Expeditionen im Polargebiet die Zusammensetzung des Blutes der Teilnehmer untersucht und fand erstaunlicherweise keine wesentlichen Veränderungen.

Andrerseits ist uns der Typus des „Stubenhockers" geläufig, dessen blasse und welke Haut den Lichtmangel erkennen läßt. Wie anders sieht dagegen die Haut der aus der Sommerfrische heimkehrenden Städter oder der Sporttreibenden aus!

Wer einmal einen Transport von Großstadtkindern vor und nach einer Klimakur gesehen hat, wird diesen eindrucksvollen Beweis für die Strahlenwirkung nicht vergessen. Allerdings darf man für diese und andere Erscheinungen nicht nur die Strahlung verantwortlich machen. Sicherlich spielen die Freiluftwirkung, eine ausgiebige körperliche Bewegung, eine vernünftige Lebensweise im allgemeinen eine große Rolle, und es ist auch für die bioklimatische Forschung sehr schwierig, die Wirkungen der Strahlung von denen der Freiluft zu trennen.

Die Sonnenstrahlung ist in unseren Breiten starken jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Eine Anzahl von Krankheiten weist ebenfalls einen typischen jahreszeitlichen Gang auf. Es liegt nahe, diese „Saisonkrankheiten" mit den Strahlungsbedingungen in Zusammenhang zu bringen. Auch hierbei ist zu berücksichtigen, daß unsere gesamten Lebens- und Ernährungsbedingungen saisonmäßigen Schwankungen unterworfen sind, die zwar ursächlich mit den Schwankungen der Sonnenstrahlung zusammenhängen, aber doch nur auf indirektem Wege auf den Menschen wirken.

Wenn wir danach die Frage nach der Lebensnotwendigkeit der Strahlung beantworten wollen, müssen wir feststellen, daß für Mensch und Tier der direkte Empfang der Sonnenstrahlung nicht lebensnotwendig ist. Aber dennoch wäre das Leben ohne Sonnenstrahlung auf der Erde nicht möglich, weil die Organismen zum Leben im Dunkeln Nahrung benötigen, die von Lichtwesen stammt. Fast alle Pflanzen brauchen Licht zur Existenz und zum Aufbau einer Reihe von Stoffen, die für Mensch und Tier lebensnotwendig sind (Chlorophyll u. a.). So ist die Sonnenstrahlung für alles organische Leben auf der Erde von größter Bedeutung. Zugleich unterliegt es auch keinem Zweifel, daß der direkten Wirkung der Sonnenstrahlung auf die höheren Lebewesen bedeutende Einflüsse auf den Ablauf der Lebensvorgänge zukommen und daß den Strahlungsbedingungen und Strahlenwirkungen die größte Beachtung geschenkt werden muß.

3. Strahlungsquellen und spektrale Zusammensetzung

a) Langwellige Abstrahlung der Umgebung

Für das Verständnis der Strahlungsvorgänge ist die Tatsache wichtig, daß jeder Körper elektromagnetische Strahlung aussendet, soweit seine Eigentemperatur über dem absoluten Nullpunkt (—273° C) liegt. Die „dunkle" Strahlung eines schwarzen Ofens ist von derselben Art wie die eines leuchtenden Körpers, sie unterscheidet sich von ihr nur durch die Wellenlänge der Strahlung. Hier gilt das Gesetz, daß mit steigender Temperatur die Abstrahlung wächst und zugleich der Schwerpunkt der Strahlung nach den kürzeren Wellenlängen zu verschoben wird. Für die Entwärmung von Körpern relativ niedriger Temperatur ist die Abstrahlung im ultraroten Spektralgebiet von großer Bedeutung. So gibt z. B. der nackte menschliche Körper im Zimmer etwa die Hälfte seiner Wärmeproduk-

tion durch Ausstrahlung ab, während das übrige auf die Ableitung durch die kühle Luft und auf die für Wasserverdunstung aufgebrachte Wärme entfällt. Da in unseren Breiten die uns umgebenden Gegenstände im allgemeinen kühler als unsere Körperoberfläche sind, ist hier der menschliche Körper der gebende Teil. Manche Erscheinungen des täglichen Lebens finden darin eine Erklärung, z. B. die Tatsache, daß im Winter geheizte Räume nach einer kurzen, aber ausgiebigen Lüftung lange nicht so kalt empfunden werden, als es der Lufttemperaturabnahme entsprechen würde, denn die Wände sind noch warm und damit ist die Abstrahlung ebenfalls gleich geblieben. Der auffallende Unterschied der Wärmeempfindung in Nächten mit klarem und bedecktem Himmel beruht im wesentlichen auf der stärkeren Abstrahlung in klaren Nächten, der auch der Erdboden unterworfen ist, woraus sich die Gefahr der Bodenfröste ergibt.

Im Sommer kann bei Windstille und Sonnenschein der Fall eintreten, daß die Gegenstände der Umgebung eine höhere Temperatur annehmen als die Körperoberfläche des Menschen. Straßendecke und Hausmauern können Temperaturen bis 50° annehmen. In diesem Falle findet auch auf der Schattenseite der Straßen eine langwellige Einstrahlung auf den Menschen statt, die erhebliche Beträge annehmen kann. Das sind die Tage der „brütenden Hitze", welche die Gefahr des Hitzschlages bedingen.

Eine Bedeckung des Bodens mit Pflanzen läßt infolge deren Wasserverdunstung niemals so hohe Temperaturen entstehen. Ähnlich wirkt eine Besprengung der Straßen, wobei die Wirkung der Bodenabkühlung und der dadurch bedingten Minderung der Bodenabstrahlung den menschlichen Wärmehaushalt erfahrungsgemäß stärker als die entgegengesetzte Erhöhung der Luftfeuchtigkeit beeinflußt. Man muß dabei bedenken, daß die Luft diese Strahlung fast ungehindert durchläßt, daß sie also weder als Strahlungsquelle noch als Filter wirken kann. Dafür treten die festen und flüssigen Gegenstände der Umgebung als Strahler auf, im Zimmer Wände, Decke, Fenster, Heizkörper, Fußboden und alle Einrichtungsgegenstände. Im Freien strahlt und absorbiert (die beiden Eigenschaften sind stets quantitativ miteinander gekoppelt) die Atmosphäre selbst nur in geringem Grade, viel stärker die in ihr enthaltenen größeren Teilchen, vor allem die Wassertröpfchen. So kommt es, daß im Freien die Abstrahlung eines Körpers von Lufttemperatur gegen niedrige Wolken, die oft fast dieselbe Temperatur haben, nahezu null ist. Unter mittleren Verhältnissen gibt ein Körper von Lufttemperatur nach oben durch Abstrahlung einen Betrag von 0,1 bis 0,2 cal pro cm² und min ab, der bei klarer trockener Luft bis zu 0,3 cal ansteigen kann. Ohne den Einfluß der Lufthülle wäre der Betrag zwei- bis fünfmal größer.

Die Abstrahlung eines Körpers wächst mit der Erhebung über die Lufttemperatur. Der nackte menschliche Körper mit einer mittleren Hauttemperatur von ungefähr 33° gibt etwa das Doppelte eines Körpers von Lufttemperatur ab. Für den Wärmehaushalt fällt dieser Betrag wesentlich ins Gewicht, da er bei

nicht sehr hochstehender Sonne denjenigen der Einstrahlung übertreffen kann. Deshalb kann das Glas- und Holzdach einer Liegehalle einen großen Unterschied gegenüber dem freien Himmel bedingen, zumal gegen die horizontnahen Partien nur wenig abgestrahlt wird.

Die Abstrahlung liegt im Spektralgebiet von 5 bis 50 μ, der Strahlungsschwerpunkt bei 10 μ. Ihre Größe ist durch folgende Formel gegeben: $S = \sigma (T_0^4 - T_1^4)$ cal/cm²sec, wobei T_0 die Temperatur des abstrahlenden schwarzen Körpers, T_1 diejenige der Umgebung ist. σ ist eine Naturkonstante.

Die Abstrahlungsfähigkeit (d. h. der Grad der „Schwärze im Ultrarot") ist nicht bei allen Substanzen gleich. Da hier nur die Gegenstrahlung der Atmosphäre und der Umgebung zur Diskussion steht, werden wir später auf diese Frage zurückkommen.

b) Die Sonnenstrahlung

Die Sonnenstrahlung ist die Hauptspenderin aller Energie auf der Erde, gleichgültig in welcher Form sie uns entgegentritt, als Wärmeenergie oder chemische Energie, als Wasserkraft oder als Windkraft. Die regionalen Unterschiede und die Schwankungen der von der Sonne eingestrahlten Energie bewirken zunächst eine ganze Reihe von volkswirtschaftlich bedeutsamen Erscheinungen, die unmittelbar die landwirtschaftliche Erzeugung und gewisse mit der klimatisch bedingten Lebensweise der Bevölkerung verknüpften Wirtschaftszweige beeinflussen, weiterhin aber mittelbar kaum einen Zweig des menschlichen Daseins unberührt lassen. Die außerirdische Energie der Sonnenstrahlung schwankt dabei nur in ganz engen Grenzen in Abhängigkeit von der wechselnden Entfernung der Erde von der Sonne. Die spektrale Energieverteilung der Sonnenstrahlung außerhalb der Erdatmosphäre ist keinen wesentlichen Schwankungen unterworfen. Wir können somit alle Schwankungen in quantitativer und qualitativer Beziehung auf Einflüsse der Erdatmosphäre zurückführen. Auf dem Weg von der äußersten Grenze der Erdatmosphäre bis zur Erdoberfläche bewirken verschiedenartige Faktoren eine Änderung der Strahlung, die vom Standpunkt der Bioklimatik als sehr bedeutungsvoll anzusehen sind. Wir verfolgen daher zunächst die Sonnenstrahlung auf ihrem Weg bis zur Erdoberfläche.

Die außerirdische Energieverteilung

Die Gesamtintensität sowie die Ausdehnung des Spektrums und die Verteilung der Intensitäten einzelner Spektralgebiete sind — soweit wir die außerirdischen Verhältnisse betrachten — durch die Temperatur der strahlenden Sonnenoberfläche gegeben. Sie beträgt ungefähr 6000° Celsius. Die kalorische Gesamtintensität schwankt wenig um den Wert von 1,90 cal/cm²min (Grammkalorien oder „kleine" Kalorien auf eine zur Einfallsrichtung senkrecht stehende Fläche von einem Quadratzentimeter pro Minute). Die langwellige Grenze des Spektrums

ist schwer festzulegen, sie liegt am Übergang zu denjenigen elektromagnetischen Wellen, die wir als „Radiowellen" betrachten, also bei Wellenlängen von Bruchteilen eines Millimeters. Das kurzwellige Ende des Sonnenspektrums ist bei unterhalb 0,2 μ (1 μ=$^1/_{1000}$ mm) anzunehmen. Der Energieschwerpunkt liegt bei 0,48 μ, also im sichtbaren Spektralbezirk, den unser Auge als blau empfindet. Außerhalb der Erdatmosphäre würde der Mensch die Sonne als äußerst intensiv weiß-blau-strahlenden Körper sehen und zwar in einem schwarzen Himmel. Die lebenden Zellen der Körperoberfläche wären bei der vorliegenden Konstitution der Eiweißbestandteile diesem Strahlengemisch nicht gewachsen, unter dessen Einwirkung vermutlich keine lebende Substanz auch nur gedacht werden könnte.

Wirkungen der Erdatmosphäre

Zweierlei Vorgänge bewirken die Verwandlung des außerirdischen Strahlengemisches: Absorption und Zerstreuung.

Absorption erfolgt durch atmosphärische Gase, sie betrifft ausgedehnte Spektralbezirke und wirkt sich besonders an beiden Enden des Spektrums aus. Dadurch wird das Spektrum eingeengt, die extrem kurzwelligen Strahlen werden wie die extrem langwelligen fast gänzlich ausgelöscht. Bestimmte Gase löschen ganz bestimmte Spektralgebiete aus, die Grenzen sind jedoch nicht scharf und die Gebiete überlagern sich gegenseitig. Die Hauptrolle spielt dabei der Sauerstoff (O_2) und das Ozon (O_3). Ersterer absorbiert bereits in größeren Höhen von über 100 km sämtliche Wellenlängen des kurzwelligsten Ultravioletts unter 0,18 μ, in ungefähr derselben Höhe, in der die Nordlichterscheinungen auftreten. Der nächstliegende Spektralbezirk wird in der Stratosphäre vom Ozon ausgelöscht; dieses Gas sorgt dafür, daß Strahlen unter 0,28 μ nicht mehr bis zur Erdoberfläche gelangen können. Zwischen den Gebieten der Sauerstoff- und Ozonabsorption konnte vor kurzem noch ein geringer Betrag um 0,21 μ an der Erdoberfläche nachgewiesen werden. Ozon wird in großen Höhen durch die Strahlenabsorption des Sauerstoffs ständig gebildet. Daneben entstehen noch andere Gase wie Wasserstoffsuperoxyd (H_2O_2) und nitrose Gase, die sich ihrerseits wieder an der Strahlenabsorption beteiligen. Wir haben hier einen Vorgang vor uns, der auch in der Strahlenbiologie eine Rolle spielt, daß nämlich ein durch Strahlenabsorption entstandenes Produkt ein gegenüber der Ausgangssubstanz geändertes Absorptionsspektrum hat.

Im langwelligen Gebiet über 1 μ ist vor allem die Absorption durch Wasserdampf wirksam. Ihm ist es zu verdanken, daß das Gebiet jenseits 3 μ praktisch ohne Bedeutung ist. Zu erwähnen ist noch die Absorption durch Kohlensäure und Stickstoff.

Es ist danach ohne weiteres klar, daß Schwankungen der Menge der einzelnen absorbierenden Gase auch Schwankungen in der Strahlungsintensität verschiedener Spektralgebiete zur Folge haben können. Diejenigen Gase, die im engeren Sinne unsere atmosphärische Luft bilden, also Stickstoff und Sauerstoff, sind nur

geringen Schwankungen unterworfen, während Ozon und Wasserdampf erhebliche Schwankungen zeigen. Dieser Umstand gewinnt dadurch noch an Bedeutung, daß das Absorptionsgebiet dieser Gase am Steilabfall der zur Erde gelangenden Spektralgebiete liegt und sich deshalb ihre Schwankungen in Fluktuationen dieser Grenzgebiete äußern. Das wirkt sich besonders einschneidend im Bereich des biologisch wichtigen Ultravioletts um 0,3 μ aus. Wir werden uns später noch mit dieser Tatsache eingehender befassen müssen. Die letzte im Sonnenlicht gemessene Wellenlänge beträgt unter günstigsten Verhältnissen 286 mμ, unter guten Flachlandverhältnissen 297 mμ und unter ungünstigen Verhältnissen 313 mμ. Damit ist auch eine Änderung der Intensität des biologisch wichtigen Endgebietes verknüpft.

Die Zerstreuung der Sonnenstrahlung wird durch sämtliche atmosphärischen Moleküle bewirkt. Auch hierbei werden nicht alle Spektralgebiete in gleicher Weise betroffen. Vielmehr steigt die Zerstreuung nach dem Rayleighschen Gesetz mit abnehmender Wellenlänge, d. h. die kurzwelligen Strahlen werden wesentlich stärker zerstreut als die langwelligen. Dadurch verarmt die direkte ungestreute Sonnenstrahlung in ihrem kurzwelligen Anteil. Wenn die Sonnenstrahlung außerhalb der Erdatmosphäre — wie wir oben sahen — ihren Energieschwerpunkt im Gebiet des Blau hat, so ist dieser an der Erdoberfläche bereits in das Gebiet der Gelbstrahlung gewandert — wie jeder Blick auf die Sonne zeigt — bei der tiefstehenden Sonne um die Zeit des Sonnenauf- und -unterganges sogar bis ins rote Spektralgebiet. Die Ursache für die letztere Erscheinung liegt darin, daß bei horizontnahem Sonnenstand die von den Strahlen zu durchlaufende Weglänge innerhalb der Atmosphäre ein vielfaches von derjenigen bei zenitalem Stand der Sonne beträgt. Setzen wir die Weglänge bei Zenitstand = 1, so ergibt sich für eine Sonnenhöhe von 30° die doppelte Weglänge, von etwa 20° die dreifache Weglänge. Maßgebend ist die Zahl der auf diese Weglänge entfallenden Gasmoleküle. Der Grad der Schwächung der direkten Sonnenstrahlung wird durch den „Transmissionskoeffizienten" (q) ausgedrückt, der das Verhältnis der bei Zenitstand der Sonne bis zur Erdoberfläche (Meereshöhe) gelangenden Intensität zur außerirdischen Intensität bezeichnet. Für den zunächst betrachteten Fall reiner molekularer Streuung gibt folgende Tab. II Aufschluß über die Schwächung verschiedener Spektralgebiete:

Tabelle II

Transmissionskoëffizienten für rein molekulare Streuung

Wellenlänge in mμ	300	320	350	400	500	600	700	1000	1800	2000
Transmissionskoëffiz.	0,32	0,42	0,55	0,71	0,87	0,94	0,97	0,99	1,00	1,00

Aus Tabelle II ist zu ersehen, daß der Weg senkrecht durch die Erdatmosphäre den biologisch wichtigsten Teil der Strahlung um 300 mμ herum auf $^1/_3$, das langwellige UV. auf die Hälfte, das Blau auf $^3/_4$ reduziert, während das Gelb

nur um 10% geschwächt wird und das Ultrarot von 1—3 mμ so gut wie gar nicht. Für die doppelte Weglänge beträgt der Transmissionskoeffizient $q \times q$.

Dieser Verlauf der Transmissionskurve ist dadurch bedingt, daß die streuenden Teilchen, die Gasmoleküle, in ihrem Durchmesser wesentlich kleiner als die Wellenlängen der durchfallenden Strahlung sind. Nun enthält die Atmosphäre aber noch größere Teilchen verschiedener Art und Herkunft, die unter der Bezeichnung „Aerosol" zusammengefaßt werden. Es handelt sich dabei einmal um Zusammenlagerungen von Gasmolekülen unter Anlagerung von Wasser. Im besonderen neigen gewisse Gase wie Wasserstoffsuperoxyd und nitrose Gase zu derartigen Anlagerungen. Ferner gehören hierher kleinste Salzkristalle und Staubteilchen. Stärkere Beimengungen dieser Art machen sich durch Lichtzerstreuungen dem Auge bemerkbar und werden als Dunst, Staub, Nebel, Wolken u. ä. bezeichnet.

Diese Aerosole verursachen nun eine zusätzliche Schwächung der Sonnenstrahlung, und zwar durch Absorption und Zerstreuung. Letztere erfolgt durch Beugung wie auch durch diffuse Brechung und Reflexion. Das Rayleighsche Gesetz gilt nun nur für Teilchendurchmesser bis 500 mμ, entsprechend der Wellenlänge des Grün. Bei größeren Teilchen wird vorwiegend das sichtbare Licht gestreut, während die ultrarote Strahlung noch relativ gut durchkommt. Bekanntlich gibt die Infrarotphotographie bei Dunst (Teilchendurchmesser 400 mμ) noch scharfe Abbildungen. Die Absorption durch die Aerosole schwächt im wesentlichen alle Spektralgebiete in gleichem Maße, es handelt sich dabei also nicht um spezifische Absorptionen.

Was geschieht nun mit den Energiebeträgen, um welche die Sonnenstrahlung geschwächt wird? Der auf die Absorption entfallende Betrag wird in eine andere Energieform übergeführt. Die „Anregung" von Molekülen bedeutet die Schaffung eines höheren Energieniveaus der Moleküle, die diese zu Reaktionen befähigt, welche sonst nicht oder nur unter besonderen Bedingungen vorkommen. Durch die Überführung in Wärme wird die Strahlung in eine wesentlich langwelligere, ultrarote Strahlung umgewandelt, die zum Teil als „Gegenstrahlung der Atmosphäre" der Erdoberfläche zugute kommt. Der andere Teil wird in den Weltenraum abgestrahlt. Von dem auf die Zerstreuung entfallenden Betrag geht ebenfalls ein Teil in den Weltenraum verloren. Der andere Teil kommt der Erdoberfläche als indirekte Sonnenstrahlung, als Himmelsstrahlung zugute.

c) Die Himmelsstrahlung

Nach den vorangegangenen Ausführungen über die Zerstreuung der Sonnenstrahlung können wir nun einige Gesetzmäßigkeiten der Himmelsstrahlung ohne weiteres ableiten.

Da nach dem Rayleighschen Gesetz vorwiegend der kurzwellige Teil der Sonnenstrahlung geschwächt wird, müssen in der Himmelsstrahlung vorwiegend diese Spektralgebiete vertreten sein. Dadurch kommen die blaue Farbe des Himmels

sowie der Ultraviolettreichtum der Himmelsstrahlung zustande. In unseren Breiten übertrifft in Meereshöhe das Himmelsultraviolett stets das der direkten Sonnenstrahlung, wie aus Tabelle I gefolgert werden kann.

Wie wir sahen, erfolgt nun aber die Schwächung der Sonnenstrahlung nicht nur durch molekulare Beugung, sondern auch durch diffuse Brechung und Reflexion an den Aerosolen. Von einer gewissen Teilchengröße sind diese Vorgänge wellenlängenunabhängig. Auf diese Weise kann die Himmelsstrahlung wechselnde Beträge sichtbaren Lichtes enthalten. Der Himmel erscheint weißlich, trübe. Bei bestimmten Teilchengrößen können einzelne Farbgebiete bevorzugt vertreten sein. Damit finden zum Teil die mancherlei Farberscheinungen, welche besonders bei tiefstehender Sonne am Himmel auftreten, eine Erklärung.

Die Himmelsbläue, für die eine Meßskala nach Linke-Ostwald besteht, ist ein wertvolles und leicht zu gewinnends Maß für den Gehalt der Atmosphäre an Aerosolen.

Die Himmelsstrahlung bringt die durch die trübungsbedingte Schwächung der Sonnenstrahlung entstehende Strahlungseinbuße weitgehend wieder ein. Strahlungsklimatische Angaben, die sich auf die Intensität der Sonnenstrahlung beschränken, geben somit ein falsches Bild des wirklichen Strahlungsklimas. Der Fehler wächst um so mehr, je größer die Trübung ist, also vornehmlich im Tiefland, in höheren geographischen Breiten, in der kühleren Jahreszeit, also hauptsächlich bei niedrigeren Sonnenhöhen. Manche falschen Schlüsse sind durch Vernachlässigung der Himmelsstrahlung zustande gekommen. Wir werden später verschiedentlich die Rolle der Himmelsstrahlung für das Ultraviolettklima zu erörtern haben.

Der Einfluß der Bewölkung

Zur Gruppe der Aerosole gehören auch die Wolken, deren Einfluß auf die Strahlenverhältnisse hier in Zusammenhang besprochen werden soll. Je nach der Art der Bewölkung handelt es sich um Aerosole von mehr oder weniger gleichmäßiger Flächenschichtung (stratus) oder um isolierte Anhäufungen (cumulus). Dichte und Mächtigkeit der Wolken können außerordentlich verschieden sein, ebenso die Höhe über dem Erdboden. Gelegentlich treten in 80 km Höhe feine stratosphärische Dunst- bzw. Staubwolken auf, die vulkanischen Ursprungs sind und mehrmals die Erde umwandern können. Auch verdampfende Meteore können solche Wolken hinterlassen. Diese geben zu farbenprächtigen Dämmerungserscheinungen Anlaß und sind gelegentlich nachts als „leuchtende Nachtwolken" zu sehen. Die höchsten troposphärischen Wolken, die Cirren, sind wenig dicht, verstärken die Himmelsstrahlung im Sichtbaren und lassen häufig beim Durchtritt der Sonnenstrahlung durch dünnschichtige Partien eine Lichtbrechung in Form von Haloerscheinungen erkennen. Dichte und Mächtigkeit der Wolken sind an der Schattenbildung abzuschätzen. Sonnenbeschienene Wolkenflächen haben ein großes

Reflexvermögen, wie es an den blendendweißen Kumuli am besten zu beobachten ist.

Aus dieser kurzen Beschreibung geht schon hervor, wie außerordentlich mannigfaltig der Einfluß der Bewölkung auf die Sonnen- und Himmelsstrahlung sein kann. Die Definition des Bewölkungszustandes bereitet bei der Mannigfaltigkeit gleichzeitiger Erscheinungen große Schwierigkeiten. Die übliche Schätzung des Grades der Himmelsbedeckung (Stufen 0—10) nebst Schätzung der Dichte gibt nur ganz grobe Maße. Aus diesen Gründen wurde die Veränderung der Strahlungsverhältnisse durch verschiedene Bewölkungsformen erst in neuester Zeit erforscht, das Hauptgewicht der Untersuchungen liegt bei wolkenlosen Strahlungstagen, denen in unserem Klima in Anbetracht ihrer Seltenheit weniger praktische Bedeutung zukommt. Hier seien nur kurz die Möglichkeiten des Bewölkungseinflusses zusammengestellt.

Die gesamte Wärmeeinstrahlung (Sonne + Himmel) kann durch Bewölkung bei gleichzeitiger ungehinderter direkter Sonnenstrahlung infolge von Reflexion an den Wolkenflächen nicht unerheblich gesteigert werden. Bei bedeckter Sonne kann eine erhebliche Einbuße stattfinden. Dasselbe gilt für das sichtbare Licht, während die ultraviolette Gesamtstrahlung (siehe Abb. 2) offenbar durch Bewölkung nur herabgesetzt wird, da der klare Himmel meist die größte Ultraviolettstrahlung gibt.

Der mindernde Einfluß der Bewölkung auf die Wärmeabstrahlung der Erdoberfläche und der darauf befindlichen Körper wurde bereits besprochen, sei aber hier noch einmal besonders erwähnt.

4. Die Faktoren strahlungsklimatischer Bedingungen

Nachdem wir die Grundgesetze der Strahlendurchlässigkeit der Atmosphäre kennengelernt haben, können wir an Hand dieser Erfahrungen, die wesentlichen Faktoren zusammenstellen, von denen das Strahlungsklima eines Ortes abhängig ist.

a) Der Einfluß der Sonnenhöhe

Die Sonnenhöhe macht sich in tageszeitlichen und jahreszeitlichen Schwankungen der Strahlung bemerkbar, ferner ist durch die geographische Breite eines Ortes ein bestimmter Verlauf der Sonnenhöhen gegeben. Maßgebend für den Einfluß der Sonnenhöhe ist die von den Strahlen zu durchlaufende Schichtdicke der Atmosphäre. Wir sahen, daß bei 30° Sonnenhöhe die doppelte Schichtdicke gegenüber der bei senkrechtem Einfall in die Erdatmosphäre zu durchlaufen ist. Ist der Transmissionskoeffizient (vgl. Tab. II) bei 90° Sonnenhöhe q, so ist er bei doppelter Schichtdicke $q \times q$. Quadriert man die q-Werte der Tabelle II, so ergibt sich eine stärkere Schwächung der kurzwelligen Strahlung bei Abnahme der Sonnenhöhe. Die Schichtdicke m ist zu berechnen nach der Formel $m = \frac{1}{\cos z}$

wobei z die Zenitdistanz der Sonne bedeutet. Wir haben ferner gesehen, daß der Streuungsverlust der direkten Sonnenstrahlung weitgehend als Himmelsstrahlung wieder eingebracht wird, nicht aber der Absorptionsverlust.

Für den Tagesgang der Strahlung ergibt sich also, daß die Strahlungsintensität für alle Spektralgebiete zur Zeit des wahren Mittags am größten ist (s. Abb. 1). Die Transmissionskoeffizienten zeigen, daß nach Sonnenaufgang die Intensität der langwelligen Strahlung schnell ansteigt, gegen Mittag jedoch nur noch langsam, so daß ein breiter und flacher Mittagsrücken entsteht. Die kurzwellige Strahlung (s. Abb. 2) beginnt mit nennenswerter Intensität erst später und zeigt mittags einen schnellen und steilen Gipfel. Das bioklimatisch wichtige Verhältnis Ultraviolettintensität: kalorischer Intensität liegt also bei hohem Sonnenstand hoch. Die in manchen Gegenden auftretende mittägliche Zunahme der Bewölkung ist dabei in Betracht zu ziehen. Wichtig ist ferner, daß unter 20° Sonnenhöhe das erythemwirksame Ultraviolett nur in praktisch bedeutungsloser Intensität vorhanden ist.

Abb. 1. Tagesgang der auf die Horizontale fallenden Gesamtstrahlung von Sonne und Himmel[1] (Westerland, Juni)

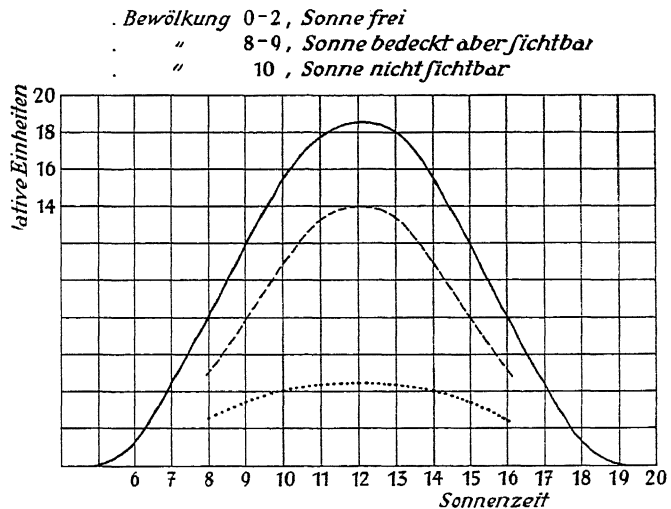



Abb. 2. Tagesgang der ultravioletten Sonnen- und Himmelsstrahlung (Westerland, Juni)

Eine bedeutende Rolle spielt für bestimmte Objekte die Verschiebung des Einfallswinkels der Strahlung mit der Sonnenhöhe. Die obigen Überlegungen galten für eine zur Strahleneinfallsrichtung senkrecht gerichtete Fläche. Die auf eine Horizontalfläche wie z. B. den ebenen Erdboden oder den flachliegenden Menschen entfallende Son-

[1] 50 Einheiten entsprechen einer gcal pro cm² und min.

nenstrahlung nimmt mit sinkender Sonne zuerst langsam dann rascher ab, sie beträgt $S_H = S_S \cdot \cos z$. Bei einem Einfallswinkel von 60° wird nur die Hälfte der auf eine senkrecht zur Strahlenrichtung einfallende Intensität eingestrahlt. Das gilt nur für direkte Sonnenstrahlung. Da in unseren Gegenden das Himmelsultraviolett gegenüber dem Sonnenultraviolett überwiegt, ist die Abnahme der Einstrahlung zunächst geringer als nach dem Kosinusgesetz zu erwarten wäre.

Für den Jahresgang der Strahlung gelten zunächst dieselben Gesetzmäßigkeiten, wie wir sie für den Tagesgang kennengelernt haben, soweit sie mit dem Wechsel der Sonnenhöhe zusammenhängen. Hinzu treten jedoch noch jahreszeitliche Änderungen des Trübungsgrades der Atmosphäre. Bioklimatisch wichtig ist vor allem der Jahresgang der Ozonschichtdicke, des natürlichen Ultraviolettfilters. Diese ist im Frühjahr am größten und bedingt zu dieser Zeit eine Einbuße an Ultraviolett bei sonst gleichen Bedingungen. Die Trübung durch Dunst ist im Sommer am größten. Der als Ultrarotfilter wirkende Wasserdampfgehalt der Atmosphäre ist im Sommer am höchsten, sein Jahresgang zeigt Beziehungen zu dem der Temperaturverhältnisse.

Zur Zeit des Sonnenhöchststandes im Sommer ist die Intensität sämtlicher Spektralgebiete am größten,[1] unbeschadet der kleinen eben besprochenen Verschiebungen im Verhältnis der verschiedenen Spektralgebiete. Zu diesem Zeitpunkt sind auch die Tage am längsten, die mögliche und tatsächliche Sonnenscheindauer hat ihr Maximum.

Die jahreszeitliche Kurve der Strahlung hat verschiedentlich das Interesse der Bioklimatiker erweckt, weil fast alle biologischen Erscheinungen jahreszeitliche Schwankungen zeigen, vor allem auch die Häufigkeit des Auftretens verschiedener *Krankheitserscheinungen*. Es ist ein beliebtes Verfahren, solchen Häufigkeitskurven irgendwelche Kurven des mittleren Jahresganges solarer Intensitäten zuzuordnen, und aus einer Ähnlichkeit des Verlaufes Schlüsse auf ursächliche Zusammenhänge zu ziehen. Für viele solcher „Saisonkrankheiten" sind auf diese Weise Schlußfolgerungen gezogen worden, um nur ein Beispiel herauszugreifen, die Häufung von Infektionskrankheiten im Winter als der strahlungsarmen Jahreszeit oder andrerseits die Häufung menstrueller Zyklusstörungen im Frühjahr und Sommer zur Zeit des starken Anstieges der ultravioletten Strahlung. Solche Verfahren dürfen aber nur mit der größten Vorsicht angewandt werden, und es ist bezüglich der Schlüsse größte Reserve am Platze, da neben Zufälligkeiten vor allem sekundäre und tertiäre Einflüsse vorliegen können.

Soweit es sich um biologische Beziehungen handelt, ist nicht nur der Intensitätsverlauf der Strahlung zu berücksichtigen, sondern auch die Strahlungsdauer, also letzten Endes die eingehenden Strahlungssummen. Ebensowenig kann andererseits die Strahlungsdauer, die Sonnenscheindauer allein als Maß genügen. Der zeitliche Verlauf der Strahlungssummen, getrennt nach Spektralbezirken,

[1] Mit Ausnahme der ultraroten Strahlung.

ist allerdings nur mühsam zu gewinnen. Er ist besonders für pflanzenbiologische Untersuchungen interessant. Für die menschliche Physiologie macht die Verschiedenheit der zeitlichen, örtlichen und geometrischen Exposition erhebliche Schwierigkeiten. Zusammenfassend können wir über den jahreszeitlichen Verlauf der Strahlung die Feststellung treffen, daß für Intensität und spektrale Verteilung im kurzwelligen Teil die Sonnenhöhen im wesentlichen maßgebend sind, und daß dagegen die anderen Einflüsse der atmosphärischen Trübung von geringerer Bedeutung sind. Günstige atmosphärische Bedingungen, z. B. im winterlichen Hochgebirge, können den Schichtdickeneinfluß völlig ausgleichen, so daß die Mittagsintensitäten im Sommer und Winter gleich sind.

b) Der Einfluß der Meereshöhe

Die Höhe über dem Meeresspiegel ist von bedeutendem Einfluß. Mit der „Meereshöhe" gewinnt die Strahlung sämtlicher Spektralgebiete an Intensität. Das ist verständlich, wenn man bedenkt, daß schon in etwa 5000 m Höhe die Hälfte der Atmosphäre, d. h. die Hälfte der Luftmoleküle unter uns liegt. Der Strahlungszuwachs liegt, wie unsere Überlegungen über den Einfluß der Lufttrübung gezeigt haben, vorwiegend bei der direkten Sonnenstrahlung, während die Himmelsstrahlung eine Einschränkung erfährt, wie der schwarzblaue Himmel durch das Auge erkennen läßt.[1] Bei hohem Sonnenstand im Sommer ist der Unterschied zwischen Tiefebene und Hochgebirge nicht so groß wie im Winter, in dem die Strahlen einen relativ weiten Weg in den stark getrübten unteren Luftschichten zurücklegen müssen und 1000 m schon eine erhebliche Luftmasse bedeuten. Außerdem ist der Unterschied für das kurzwellige Spektralgebiet größer als für das langwellige. Wie stark die Schwankungen im Ultraviolett in Abhängigkeit von Jahreszeit und Meereshöhe sind, mag ein von Goetz berechnetes Beispiel zeigen. Die sommerlichen Mittagsintensitäten von Spitzbergen (Meereshöhe 23 m), Arosa (Schweiz 1868 m) und Indien (2343 m) verhalten sich wie 64 : 410 : 550, die winterlichen dagegen wie 0 : 10 : 530. Hierbei macht sich allerdings auch noch ein geographischer Einfluß über Sonnenhöhe und Ozon bemerkbar.

Das winterliche Hochgebirge genießt mit allem Recht den Ruf eines vorzüglichen Strahlungsklimas, das die Grundlage für die breite heliotherapeutische Anwendung bildet. Im Winter, wenn im Tiefland die im kurzwelligen Teil stark geschwächte Sonne durchschnittlich nur ganz wenige Stunden scheint, strahlt im Hochgebirge die Sonne intensiv und — wenigstens in gewissen Gegenden und bei typischer Wetterlage — mit langer täglicher Dauer. Verstärkend auf die Strahlenfülle wirkt noch der starke Schneereflex. Wir werden später noch darauf zurückkommen, daß auch die Wärme- bzw. Abkühlungsverhältnisse des winterlichen Hochgebirges für die therapeutische Anwendung günstig sind.

[1] Die ultraviolette Himmelsstrahlung kann bis zu einer Höhe von 3000 m als konstant gelten.

c) Geographische Einflüsse

Auch die geographischen Unterschiede sind hier zu erwähnen. Wie wir aus den Überlegungen über den Einfluß der Aerosole entnehmen können, wird die Lage eines Ortes bezüglich der aerosolbildenden wie auch der kondensationsfördernden Gebiete für die Strahlungsverhältnisse von Wichtigkeit sein. Durch Ausregnen oder Ausfrieren der atmosphärischen Kondensationskerne kann die Luft weitgehend gereinigt und dadurch für die Strahlung besser durchlässig werden. Hierher gehört die Lage zum Meer, zu Gebirgen, zu großen Steppen- oder Wüstengebieten, zu Großstädten.

Bezüglich der geographischen Breite ist vor allem der Einfluß der Sonnenhöhe zu erwähnen. Aber darüber hinaus bestehen bedeutende Unterschiede in der Dichte strahlenabsorbierender atmosphärischer Beimengungen. Wenn die breitenbedingten Unterschiede der Strahlung einzelner Spektralgebiete bei gleichen Sonnenhöhen nicht übermäßig groß sind, so ist das dem Umstand zu verdanken, daß sich verschiedene Einflüsse gegenseitig aufheben. So ist z. B. die ultraviolettabsorbierende Ozonschicht in den Tropen bedeutend dünner, im Jahresmittel 2,2 mm gegen 3,0 mm in den gemäßigten Breiten. Das atmosphärische Ozon hat in großen Höhen von ungefähr 35 km die größte Dichte, reicht in feiner Verteilung jedoch bis zum Erdboden. Würde man sämtliches Ozon, daß sich senkrecht über einem Ort befindet, konzentrieren, so würde sich unter Normaldruck nur eine Schicht von wenigen Millimetern reinen Ozons ergeben. Trotzdem ist seine Bedeutung für die Strahlung außerordentlich groß.

In den Tropen wären also größere Ultraviolettintensitäten zu erwarten, doch wird dieser Einfluß durch die stärkere Lufttrübung zum Teil ausgeglichen. Für das ägyptische Wüstenklima wurden erhöhte UV-Intensitäten festgestellt. Da dort auch die Bewölkung außerordentlich gering ist, ergeben sich gewaltige Strahlungssummen. Früher wurde die Vermutung ausgesprochen, daß die Ozonschicht vom Äquator zu den Polen abnähme, daß somit die Arktis aus diesem Grund eine besonders intensive Ultraviolettstrahlung hätte. Für Tropen und gemäßigte Breiten hat sich diese These nicht halten lassen und die Messungen nördlich der Polarkreise bedürfen einer Nachprüfung. Beobachtungen wie das schnelle Wachstum der Pflanzen im arktischen Frühling und die Sattheit arktischer Blütenfarben lassen auch andere Erklärungen zu. Die eigentliche Lufttrübung ist in den arktischen Gebieten allerdings gering, wie wir selbst in unseren Gegenden beim Einbruch arktischer Luftmassen noch feststellen können.

d) Wettereinflüsse

Wir kommen damit zu den Wettereinflüssen auf die Strahlungsverhältnisse. Die atmosphärische Trübung ist in erheblichem Maße von der Herkunft der Luft abhängig. Aus tropischen und kontinentalen Gegenden herangeführte Luft

ist im allgemeinen stark getrübt, letztere im Sommer stärker als im Winter. Dagegen sind — wie gesagt — polare bzw. arktische Luftkörper wenig getrübt und deshalb für die Sonnenstrahlung gut durchlässig. Ferner besitzt die über einem Gebiet aus größeren Höhen absteigende Luft einen größeren Reinheitsgrad als die vom Erdboden aufgewirbelte und aufsteigende Luft. Die luftelektrischen Ionenverhältnisse geben einen guten Einblick in den Reinheitsgrad der Luft. Polare und kontinentale Luftkörper führen zudem weniger Wasserdampf als tropische und maritime Luftkörper. Aus diesen Eigenschaften lassen sich die Einflüsse auf die Strahlungsverhältnisse ableiten. Wie wir oben gesehen haben, sind diese Einflüsse für die Sonnenstrahlung allein größer, als für die gesamte Strahlung von Sonne und Himmel.

Es ist über gelegentliche Beobachtungen berichtet worden, nach denen durch Wettereinflüsse plötzlich eine starke Erhöhung der Durchlässigkeit für Ultraviolettstrahlen eintreten kann. Diese Angaben über „Löcher in der Ozonschicht" und ähnliches haben von anderer Seite keine Bestätigung gefunden, so daß in dieser Richtung keine Gefahren zu bestehen scheinen. Unerwartet starke Reaktionen nach Sonnenbestrahlung bei empfindlichen Menschen können, wie wir später sehen werden, durch temporäre Steigerung der Strahlenempfindlichkeit erklärt werden. Da die Bewölkung mit den Witterungsvorgängen eng verknüpft ist, ergeben sich wetterabhängige Schwankungen der Strahlungssummen, ebenso — wie oben festgestellt — Unterschiede zwischen Sonnen- und Himmelsstrahlung und deren spektralen Verteilung.

5. Die Reflexion der Strahlen

Bei der Strahlung des bewölkten Himmels haben wir bereits festgestellt, daß durch Reflexion ein bestimmter Ort zeitweise einen Zuwachs an Strahlung erhalten kann. Durch besondere Eigenschaften des Untergrundes kann ein über diesem befindlicher Körper ebenfalls einen erheblichen Strahlungszuwachs erhalten. Für den sichtbaren Spektralbereich ist uns der Vorgang der spiegelnden und diffusen Reflexion wohlbekannt. Wir können schon mit Hilfe des Auges die Behauptung aufstellen, daß nicht alle Spektralbereiche vom gleichen Stoff in gleichem Maße zurückgeworfen werden, denn die Farben der Gegenstände im auffallenden Licht beruhen ja auf einer mehr oder weniger „selektiven" Reflexion. Tatsächlich sind die Reflexionsvorgänge sehr mannigfaltig. Einige Stoffe reflektieren den größten Teil des Spektrums fast gleichmäßig, vom Ultraviolett bis ins Ultrarot hinein. Ein solcher Stoff ist z. B. der Schnee, der in diesem ganzen Bereich fast hundertprozentig reflektiert. Ähnlich verhalten sich einige Metalle, jedoch werden die Zahlen des Schnees von ihnen keineswegs erreicht. Schneebedeckung des Bodens hat zur Folge, daß darüber befindliche Körper unter günstigen Bedingungen fast die doppelte Zustrahlung erhalten können, ferner aber

für den Wärmehaushalt des Erdbodens ein gewaltiger Ausfall entsteht, der zur Erhaltung der Schneedecke über längere Zeit trotz warmen Sonnenscheins und sogar zur Stabilisierung winterlicher Hochdruckwetterlagen führt. Nur im Gebiet des langwelligen Ultrarot, dem Gebiet der Wärmeabstrahlung, ist der Schnee nicht weiß, sondern völlig „schwarz“, d. h. er nimmt diese Strahlung fast völlig auf und strahlt in diesem Gebiet selbst nahezu wie ein idealer schwarzer Körper, wie ein „schwarzes Loch“. Damit steht in Zusammenhang, daß bewölkter Himmel, der stets eine erhebliche Gegenstrahlung abgibt, dem Schnee wenig zuträglich ist, der sich dagegen bei klarem Himmel durch Abstrahlung stark unterkühlt.

Wenn es auch eine erhebliche Anzahl von Stoffen gibt, die im Sichtbaren gut reflektieren, so gibt es doch wenige, die im Ultrarot, und eine noch geringere Anzahl, die im Ultraviolett gut reflektieren. Es wird häufig behauptet, daß Wasser und Sand am Meeresstrand die Ultraviolettstrahlen besonders stark reflektieren. Nachdem sich herausgestellt hatte, daß die Sonnen- und Himmelsstrahlung im Seeklima nicht wesentlich höher liegt als im Binnenland, wurde ein Teil der heilkräftigen Wirkungen mit der Strahlenreflexion in Verbindung gebracht. Es hat sich aber gezeigt, daß selbst von hellem, trockenem Sand nur 10—20% reflektiert werden, vom Wasser und von jeder anderen Bodenart noch wesentlich weniger. Die Ultraviolettalbedo, d. h. das Verhältnis der auf eine Fläche von unten und oben einfallenden Strahlung ist für diese Substanzen gering. Auch für die sichtbare Strahlung ist der Betrag nur etwa doppelt so hoch, wenigstens bei hochstehender Sonne. Bei schrägem Einfall der Strahlen kann die Reflexion bis 80% betragen.

Es ist vielleicht notwendig, auf die an sich selbstverständliche Tatsache hinzuweisen, daß die Reflexstrahlung, falls sie zur Wirkung kommen soll, den Körper auch „treffen“ muß. Der stehende Mensch z. B. erhält eine erhebliche Reflexintensität, und zwar gerade an den Hautpartien, die infolge ihrer Lage von Sonne und Himmel sonst wenig Strahlung erhalten. Daher rührt der gefürchtete Gletschersonnenbrand in der Gegend unter den Augenbrauen und um die Nasenlöcher. Dagegen erhält der auf einem Liegestuhl oder Bett Liegende fast keine Reflexstrahlung von Erdboden oder Wasser.

6. Großstadtklima und Zimmerklima

Nachdem wir die Faktoren kennengelernt haben, die für das Strahlungsklima der „Großklimate“ maßgebend sind, ist noch ein Wort über das Klima zu sagen, in dem der Städter den größten Teil seines Lebens verbringt: das Klima der Großstadt und des Zimmers.

Durch Industrieanlagen und Hausbrand (Heizen und Kochen), ferner durch Kraftfahrzeuge und durch die Eisenbahn entstehen beträchtliche Verunreinigungen der großstädtischen Atmosphäre. Die Beobachtung aus dem Flugzeug gibt ein

eindrucksvolles Bild der über einer Großstadt lagernden grauen Dunstschicht von großer Mächtigkeit, in die man mit Bedauern wieder eintauchen muß. Die Stärke dieses Dunstes schwankt mit der Windgeschwindigkeit. Die Dunstschicht absorbiert ohne Zweifel einen Teil der Sonnen- und Himmelsstrahlung. Man hat nun Erscheinungen der „Domestikation", der Beeinträchtigung des Gesundheitszustandes und der gesamten Vitalität der Großstädter mit dieser Strahleneinbuße in ursächlichen Zusammenhang gebracht. Das Schlagwort vom „biologischen Dunkel der Großstadt" hat auf diese Gefahren hingewiesen. Das Schlagwort enthält zugleich die Behauptung, daß unser Auge den Sachverhalt noch nicht im richtigen Ausmaß abschätze, indem besonders die unsichtbaren, biologisch aber besonders wichtigen Ultraviolettstrahlen selektiv geschwächt würden. Entsprechende Untersuchungen ergaben jedoch, daß die Dunstpartikelchen der Großstadtatmosphäre so groß sind, daß alle Spektralgebiete gleichmäßig geschwächt werden, daß also die Einbuße an Ultraviolett nicht größer ist als die im Sichtbaren. Ferner ergab sich, daß der Betrag der Schwächung nicht so groß ist, wie zunächst vermutet worden war. Die Himmelsstrahlung zeigte sich überhaupt nicht geschwächt, da der Zuwachs durch diffuse Reflexion den Verlust durch Absorption gerade ausgleicht. Immerhin bedeuten auch schon 20%, wie sie zwischen Berlin und Potsdam festgestellt sind, eine nicht unbeträchtliche Einbuße.

Weit wichtiger ist jedoch die vom Dunst ganz unabhängige Einbuße durch direkte Abschattung der Sonnen- und Himmelsstrahlung durch die hohen und eng zusammenstehenden Bauten. Die städtischen Straßen sind Schächte, die nur eine kurze Zeit des Tages direktes Sonnenlicht erhalten, und in die nur ein kleiner Ausschnitt des Himmels hineinstrahlt. Dadurch wird die gesamte Strahlungssumme auf einen kleinen Bruchteil reduziert.

Häuserwände und Straßendecke können bei mangelhafter Luftbewegung eine beträchtliche Erwärmung erfahren. Die Abstrahlung dieser warmen Flächen kann zusammen mit der Reflexstrahlung, die — wie wir sahen — das langwellige Spektralgebiet bevorzugt, die Wärmeregulation des Großstädters erheblich belasten. Die Spektralverteilung der Großstadtstraße ist der des Schatten in der freien Natur, z. B. unter einem Baum, gerade entgegengesetzt. Im letzteren Fall sehen wir viel kurzwellige Himmelsstrahlung bei geringer langwelliger Einstrahlung, im ersteren dagegen starke Wärmestrahlung bei geringem Ultraviolettgehalt.

Im geschlossenen Zimmer liegen die Verhältnisse noch schlechter, vor allem für die tieferen Stockwerke und Hinterhäuser. Wiederum Bruchteile dessen, was die Straße übrigläßt, gelangen durch die Fenster in die Wohn- und Arbeitsräume. Hierzu kommt noch der Umstand, daß das gewöhnliche Fensterglas den biologisch wichtigen Teil der Ultraviolettstrahlung völlig absorbiert.

Nach all dem lebt der Großstädter ohne Zweifel weitgehend im Dunkeln. Die Strahleneinbuße durch den Großstadtdunst spielt dabei die geringste Rolle. Der

Städter könnte ein Vielfaches, sicher ein Mehrhundertfaches an Strahlungssummen erhalten, wenn durch genügende Grünplätze und Dachgärten weiten Volkskreisen die Möglichkeit gegeben wäre, täglich auch nur kurze Zeit in leicht bekleidetem Zustand „im Freien" zu verbringen. Die übliche Stadtkleidung hält nämlich mehr als neun Zehntel der Körperoberfläche in einem fast völligen Dunkel.

Man darf bei diesen Fragen das Augenmerk auch nicht nur auf die Strahlung richten, vielmehr darf der anregende Hautreiz durch die abkühlende Wirkung der Luft, zumal bewegter Luft, nicht vergessen werden. Wir werden später bei der Besprechung der Freilufttherapie noch darauf zurückkommen. Man darf ferner nicht vergessen, daß die Großstadtaerosole nicht nur die Strahlungsvorgänge beeinflussen, sondern zum Teil auch als Gifte auf chemischem Wege Wirkungen entfalten können. (Abgase der Kraftfahrzeuge!)

Die Bedeutung des ultraviolett-durchlässigen Fensterglases

Um die Einbuße an Ultraviolettstrahlung in geschlossenen Räumen, soweit sie durch die Absorptionswirkung des gewöhnlichen Fensterglases bedingt ist, wenigstens zum Teil auszugleichen, sind Bestrebungen geltend gemacht worden, die Fenster mit ultraviolett-durchlässigem Glas zu versehen. Vor allem für die Aufenthaltsräume von Kindern wurde eine solche Verglasung gefordert. Aus den obigen Auseinandersetzungen geht jedoch hervor, daß die Fenster den kleinsten Anteil am Strahlenmangel des Großstädters liefern und daß das beste Glas nicht mehr durchlassen kann, als an Strahlung auf die Fensterfläche entfällt. Da das Spezialglas ungefähr dreimal so teuer ist wie gewöhnliches Glas, lohnt sich das Verfahren nicht. Höchstens kommt es für Liegehallen in kühlen Klimaten während der Übergangsjahreszeit in Frage, wenn draußen schon genügend Ultraviolett zur Verfügung steht, der Körper aber wegen der hohen Abkühlungsgröße noch nicht für längere Zeit entblößt werden kann.

7. Die Methoden der Strahlenmessung

Unsere Kenntnisse über Intensität und spektrale Verteilung der natürlichen Strahlung beruhen auf Messungen mit jeweils dem Zweck angepaßten Methoden. Eine ausführliche Darstellung der Meßmethoden liegt nicht im Sinne dieser Abhandlung. Das Wesen der gebräuchlichsten Methoden soll jedoch kurz erörtert werden, soweit es dem Verständnis der Strahlungsvorgänge dienlich ist. Dabei sind zwei Fragen zu stellen, einmal nach der apparativen Technik, zweitens nach der Art des Strahlenempfanges.

a) Kalorische Methoden

Grundsätzlich können alle Spektralgebiete der Sonnen- und Himmelsstrahlung mit *kalorischen Methoden* gemessen werden, d. h. durch Messung der bei der Strahlenabsorption entstehenden Wärme. Man verwendet dazu gut geschwärzte

Meßkörper, deren Temperaturerhöhung bei der Strahlenabsorption verfolgt wird. Dabei besteht das Hauptproblem darin, unkontrollierbare Wärmeeinwirkungen anderer Art auszuschalten. Im Grunde genügt dafür die Einbettung des Meßkörpers in die Tiefe eines massigen Schutzkörpers, wobei die Strahlen durch eine möglichst enge Öffnung ins Innere gelangen, damit der Einfluß von Luftbewegungen sicher ausgeschaltet wird. Die Öffnung kann auch mit einem Quarzglas verschlossen werden, das alle in Betracht kommenden Spektralgebiete fast ungehindert durchläßt. Auf diese Weise erhält man die gesamte kalorische Intensität der einfallenden Strahlung.

Die Temperaturmessung kann entweder mit Quecksilberthermometern erfolgen oder an Hand der Krümmung von Bimetallstreifen oder auf thermoelektrischem Wege mit Thermoelementen bzw. Thermosäulen oder widerstandselektrisch mit Bolometern. Die beiden letzteren Methoden sind sehr empfindlich zu gestalten.

Für die Messung einzelner Spektralgebiete stehen folgende Wege offen: erstens die spektrale Zerlegung vor dem Einfall in das Meßgerät durch Prismen oder Gitter, zweitens die Einschaltung von Filtern in den Strahlengang zum Zwecke der völligen Absorption der nicht gewünschten Spektralbezirke. Im allgemeinen wird der letztere Weg wegen seiner Einfachheit und Billigkeit bevorzugt, zumal die Glasindustrie eine große Auswahl von Filtern für alle möglichen Zwecke herstellt, durch deren Kombination eine weitgehende Unterteilung des Spektrums möglich ist. Die Filter schneiden natürlich nicht einen Bezirk scharf heraus, doch verlaufen die Durchlässigkeitskurven an den Grenzen mehr oder weniger steil. Dieser Umstand beeinträchtigt jedoch die Brauchbarkeit dieser Methode im allgemeinen nur wenig, zumal die Kurven biologischer Wirkungen in ähnlicher Weise abklingen.

Die gebräuchlichsten mit dieser Methode gewonnenen Spektralbezirke umfassen Rot-Ultrarot, Gelborange und Blaugrün. Für das Ultraviolett gibt es zwar ein Filter, das diesen Bezirk unter Abfilterung der sichtbaren Strahlen durchläßt, jedoch ist die kalorische Intensität für die üblichen Meßmethoden zu gering.

b) Die photoelektrische Methode

Für das kurzwellige Ende des Sonnenspektrums werden photoelektrische oder chemische Methoden angewendet. Im Gegensatz zu der Strahlenabsorption durch schwarze Körper besitzt der aufnehmende Körper der Photozelle eine selektive Empfindlichkeit, d. h. die Auslösung des Photoeffektes ist auf gewisse Spektralbezirke beschränkt, je nach Auswahl des empfindlichen Belages. Kupferoxydzellen finden in der Technik und als photographische Belichtungsmesser verbreitete Anwendung, ferner gibt es Rubidium-, Kalium- und Kadmiumzellen. Letztere haben namentlich für die Ultraviolettmessung besondere Bedeutung erlangt. Durch den Strahleneinfall werden Elektronen ausgelöst, der Effekt wird durch Messung der entstehenden Photospannung bzw. des Photostromes erfaßt. Die Kombination

mit der Filtermethode gestattet eine sehr feine spektrale Unterteilung. Das wertvollste Material über die Intensität der kurzwelligen Strahlung, insbesondere im Dornobereich wurde mit Hilfe der Kadmiumzelle auf photoelektrischem Wege bestimmt. Allerdings verursachen die Unterschiede der spektralen Empfindlichkeit bei verschiedenen Zellenindividuen auch heute noch große Schwierigkeiten, da die Vergleichbarkeit unter diesem Umstand leidet. Manche mühevolle Arbeit ist dadurch entwertet worden.

c) Die photographische Methode

Lichtempfindliches photographisches Papier hat lange Zeit in der Lichtforschung eine große Rolle gespielt. Umfangreiche Meßreihen wurden mit dem Graukeilphotometer gemacht. Durch eine mit logarithmisch steigender Schwärzung versehene Glasplatte (optischer Keil) fällt die Strahlung in abgestuften Intensitäten auf lichtempfindliches Papier, wobei der Schwellenwert als Maß gilt. Damit wird im wesentlichen das blauviolette Spektralgebiet erfaßt. Die Schwärzung ist für längere Belichtungszeiten, für Stunden- bis Halbtageswerte eingerichtet und ermöglicht so die Feststellung von Summenwerten. Die Methode ist an Bedeutung gegenüber den Meßverfahren im Dornogebiet zurückgetreten, für bestimmte bioklimatische Fragestellungen dürfte sie jedoch noch beachtliche Vorteile bieten.

d) Die photochemischen Methoden

Diese haben die Nachfolgeschaft der Graukeilphotometrie angetreten. Im Lauf der Zeit wurden verschiedene photochemische Reaktionen der Strahlenmessung dienstbar gemacht, jedoch war — wie beim Graukeilphotometer — zumeist der spektrale Schwerpunkt für die Belange der menschlichen Physiologie nicht genügend kurzwellig. So sind Methoden wie die Jod-Kali-Stärkemethode und die Methylenblaumethode verlassen worden. Als die beste photochemische Methode zur Erfassung von Strahlungssummen im kurzwelligen Gebiet hat sich die Azetonmethode gezeigt. Die Hauptschwierigkeit liegt bei diesen Methoden in der erheblichen Temperaturabhängigkeit der Reaktion während und nach der Bestrahlung.

Mit Recht hat sich das klimatologische UV-Dosimeter der J. G.-Farbenindustrie in der ärztlichen Praxis eingebürgert. Die spektrale Empfindlichkeit ist weitgehend derjenigen der menschlichen Haut bezüglich der Erythemwirkung angeglichen. Das Gerät ist handlich und ermöglicht die schnelle Feststellung von Momentanwerten. Deshalb ist es für medizinische Zwecke besonders geeignet. Einige Schwierigkeiten wie mangelhafte Konstanz der Empfindlichkeit und Abweichungen verschiedener Exemplare untereinander sind jetzt offenbar weitgehend beseitigt. Eine Leukosulfitverbindung des Fuchsins, die im Dunkeln farblos ist, färbt sich durch Bestrahlung mit dem Dornobereich rot. Der Rötungsgrad wird kolorimetrisch durch Vorschalten verschieden starker Grünfilter bestimmt.

e) Anordnung der Strahlenempfänger

Für bioklimatische Zwecke ist ohne Zweifel die Feststellung der auf eine Kugelfläche fallenden Strahlung am wertvollsten, gleichgültig um welches Spektralgebiet es sich handelt. Für das lebende Objekt als Strahlenempfänger ist es zumeist ganz gleichgültig, ob die Strahlung von der Sonne direkt oder vom Himmel oder als Reflexstrahlung vom Untergrund kommt. Wichtig ist in erster Linie die Gesamtsumme dieser Strahlungen. Der Grund liegt darin, daß wir es im allgemeinen weder mit senkrecht zum Einfall der Sonnenstrahlung stehenden noch mit horizontal liegenden flächenhaften Objekten zu tun haben, sondern viel eher mit zylinderförmigen, soweit der Mensch in Betracht kommt. Da die Lage dieser Zylinder zu Sonne und Himmel wechselt je nachdem die Menschen liegen, gehen oder stehen, je nachdem breite oder schmale Projektionsflächen der Sonne zugekehrt sind, erfaßt die Kugelform die Summe aller möglichen Fälle. Für den horizontal liegenden Menschen kommt dagegen eher die auf die Horizontalfläche fallende Sonnen- und Himmelsstrahlung in Betracht, die „Oberstrahlung", wie man sie in Anlehnung an das „Oberlicht" im sichtbaren Gebiet nennen kann. Die Bezeichnung der Franzosen „radiation globale" für diese Strahlung würde besser für die auf die Kugelfläche fallende Strahlung geeignet sein. Die Oberstrahlung ist am einfachsten festzustellen, da der Meßkörper nicht der Sonne nachgeführt werden muß. Die kalorimetrische Intensität wird mit sogenannten Pyranometern gemessen, deren schwarzer oder schwarzweißer Meßkörper von einer halbkugelförmigen Glasglocke bedeckt ist. Im letzteren Fall wird der Unterschied der von schwarzen und weißen Lamellen aufgenommenen Strahlung gemessen zur Ausschaltung der langwelligen Strahlung der Glaskugel. Gebräuchlich sind die Pyranometer von Angström, Linke und Robitzsch.

Die direkte Sonnenstrahlung wird mit Pyrheliometern und Aktinometern gemessen.

Für bestimmte Fragestellungen, insbesondere der Wohnungshygiene, aber auch für botanische Probleme ist die Unterteilung in Oberstrahlung, Unterstrahlung und in südliche, östliche, westliche und nördliche Seitenstrahlung geboten. Im sichtbaren Gebiet wird die Summe dieser Strahlungen als „Ortshelligkeit" bezeichnet.

Was hier für die Einstrahlung gesagt wurde, gilt im wesentlichen auch für das Gebiet der langwelligen Abstrahlung der Körper. Da die Gegenstrahlung aus verschiedenen Richtungen große Unterschiede zeigen kann, so ist auch die „Effektivstrahlung" richtungsabhängig.

Aus all diesen Gründen wird man kaum je die von einem Meßgerät gelieferten Strahlungsintensitäten oder Strahlungssummen ohne weiteres auf ein lebendes Objekt übertragen können, vielmehr sind meist schwierige Untersuchungen notwendig, um den Einflüssen der Oberflächengestaltung, der Expositionsrichtung sowie der Strahlungseigenschaften der Oberfläche bezüglich Reflexion, Absorption und Abstrahlungsfähigkeit Rechnung zu tragen.

8. Die Wirkung der natürlichen Strahlung auf die Lebewesen

a) Theorie der Strahlenwirkungen

Der Mannigfaltigkeit der natürlichen Strahlungsvorgänge steht im biologischen Geschehen die Mannigfaltigkeit der Strahlenwirkungen gegenüber. Man hat geglaubt, der Vielzahl der Erscheinungen nur gerecht werden zu können durch die Annahme ganz spezifischer Eigenschaften jeder Wellenlänge oder wenigstens einer Anzahl umschriebener Wellenlängengruppen. Wir haben mehrfach hervorgehoben, daß nicht allen Strahlenbereichen die gleiche biologische Bedeutung zukommt. Und dennoch ist die Forschung heute zu dem Ergebnis gekommen, daß es eine Wellenlängenspezifität im Grunde genommen nicht gibt. Dieser Widerspruch läßt sich dahin auflösen, daß in der Organisation der Lebewesen für bestimmte Stoffe verschiedene Absorptionsbedingungen begründet sind. Über diese Absorptionsbedingungen läßt sich folgendes aussagen: Bestimmte Stoffe haben je nach ihrer molekularen Struktur verschiedene Absorptionsspektren, d. h. manche Wellenlängen werden stärker, andere in schwächerem Maße, manche so gut wie gar nicht absorbiert. Bei der Absorption wird die Strahlungsenergie in eine andere Energieform übergeführt. Wir haben bereits gesehen, daß bei der Strahlenmessung von dieser Energieumwandlung Gebrauch gemacht wird, und daß schließlich die Energie aller Wellenlängen in Wärme übergeführt werden kann. Nach der Dessauerschen „Punktwärmehypothese" sind auch die chemischen Strahlenwirkungen durch Wärmeentstehung zu erklären, indem im kleinsten Raum, in Teilen eines Moleküls beträchtliche punktförmige Temperatursteigerungen entstehen, die zwar bald wieder ausgeglichen werden, aber doch ausreichen, um vorübergehende oder dauernde Änderungen der Moleküle zu hinterlassen. Dadurch werden gewisse chemische Reaktionen beschleunigt oder in Gang gebracht. In der Photochemie nimmt man heute statt der Punktwärme an, daß die Atome und Moleküle durch die Strahlenabsorption in einen „Anregungszustand" gebracht werden, der sie zu Reaktionen befähigt, wie sie sonst nur unter bestimmten, extremen Bedingungen möglich sind. Man kann also bezüglich der Spezifität der Strahlenwirkungen sagen, daß sich verschiedene Stoffe bestimmten Spektralgebieten gegenüber spezifisch verhalten, indem verschieden große Energiebeträge derselben zur Molekülanregung verbraucht werden. Ob dagegen bei gleichen aufgenommenen Energiebeträgen eine Spezifität verschiedener Wellenlängen besteht, ist noch nicht sicher entschieden. Die meisten Beobachtungen sprechen für eine Wellenunabhängigkeit, wenn auch mit gewissen Einschränkungen.

Diese Überlegungen gelten für sozusagen freiliegende Stoffe, an die eine bestimmte Strahlenenergie herangebracht wird. Nun besteht beim biologischen Objekt, angefangen bei der einzelnen Zelle bis zum organismischen Zellverband keine gleichmäßige Vermengung von verschiedenen Molekülen, sondern es liegen bestimmte Strukturen vor, die wir auch als Schichtungen betrachten können. Da

nun jede Schicht, im kleinen wie im großen, der Strahlung gegenüber ein eigentümliches Verhalten zeigt, ist es für die Strahlenwirkungen von großer Bedeutung, in welcher Reihenfolge die Schichtung besteht. Die freiliegende Zellmembran schafft infolge ihrer physikochemischen Struktur für das Zellprotoplasma ein besonderes, abgeändertes „Strahlungsklima", für das Protoplasma gilt wiederum bezüglich des Zellkernes dasselbe. Die äußerste Zellschicht ist anderen Strahlungsbedingungen ausgesetzt wie die nächstfolgende usw. Da die höheren Organismen aus vielerlei Schichten ganz verschiedener Struktur und chemischer Zusammensetzung aufgebaut sind, wird das Strahlungsklima mit jedem tausendstel Millimeter abgewandelt, innerhalb der einzelnen Schichten gleichsinnig, an den Schichtgrenzen sprunghaft. Es liegt hier dieselbe Erscheinung vor, die wir beim Durchgang der Strahlung durch die Atmosphäre beobachtet haben, nur mit dem Unterschied, daß das Geschehen sich hier auf Kilometer erstreckt, was dort in der Größenordnung von tausendstel Millimetern vor sich geht. Für die biologischen Wirkungen der Strahlung spielt die Einwirkung auf die Eiweißkörper eine überragende Rolle. Diese Wirkungen sind nicht auf die lebende Zelle beschränkt, sie gehen ebensogut im Reagenzglas vor sich. Die Bedingungen des „inneren Milieus" sind jedoch im Organismus von großer Bedeutung. Im Reagenzglas kann eine große Anzahl von Strahlenwirkungen beobachtet werden, es ist ja allgemein bekannt, daß gewisse chemische Verbindungen in braunen Flaschen aufbewahrt werden müssen, damit bestimmten Spektralgebieten der Zutritt verwehrt wird. Durch Lichtzutritt können gefährliche explosive Verbindungen beschleunigt entstehen. Wir kennen oxydierende wie auch reduzierende Strahlenwirkungen. Die Koagulationstemperatur der Eiweiße und andere ihrer besonderen Eigenschaften werden verändert. Besonders empfindlich sind Fermente, die teils aktiviert, zumeist aber zerstört werden.

b) Strahlungseinflüsse auf Pflanzen

Die aufbauende Tätigkeit der Pflanzenzelle, welche die Grundlage für alles Leben auf der Erde bedeutet, ist im wesentlichen nur durch Strahlenwirkung möglich. Ernährung, Wachstum und Fortpflanzung sind bei der Pflanze an Lichtaufnahme gebunden. Beim tierischen Organismus ist das nicht der Fall, dieser ist dafür aber völlig auf die durch aufbauende Vorgänge in der Pflanzenzelle gebildeten Stoffe angewiesen. Bei Chlorophyllpflanzen wird die Strahlenenergie durch die Chloroplasten aufgenommen, die dadurch befähigt werden, die Kohlensäure der Luft zu zerlegen und den Kohlenstoff in Form von höherwertigen Verbindungen neu zu binden. Das ist der Vorgang der Kohlehydratsynthese, durch den Zucker und Stärke in den Pflanzenzellen abgelagert werden. Der Grad der synthetischen Wirkung ist offenbar proportional der durch die Zellpigmente absorbierten Strahlenenergie, ist also an sich wellenlängenunabhängig. Durch die Reflexion und Absorptionsverhältnisse der Pigmente beteiligen sich jedoch gewisse Spektral-

gebiete, insbesondere im Rot-Orange-Gebiet, bevorzugt. Bei der Kohlensäurezerlegung und der Umbildung der primär entstandenen Produkte sind verschiedene Spektralgebiete wirksam. Das Chlorophyll ist für die Photosynthese der Kohlehydrate unentbehrlich, es ist isoliert dazu aber nicht im Stande, sondern nur im Zusammenhang mit den die Chloroplasten umschließenden Teilen der Zelle. Die Wirkung des Lichtes ist nicht auf die bestrahlten Teile beschränkt, wenn auch dort die Photosynthese wesentlich ausgiebiger verläuft.

Die Synthese verläuft vermutlich über die Bildung von Formaldehyd, wobei Sauerstoff abgespalten wird und durch Polymerisation Zucker und weiterhin Stärke entsteht. Das Ausmaß ist abhängig von der Oberflächengröße der Blätter, dem Chlorophyllbestand und der eingestrahlten Lichtmenge. Pflanzenteile, die längere Zeit im Dunkeln gehalten werden, verlieren langsam ihren Stärkebestand.

Die Bedingungen für die Chlorophyllbildung sind bei verschiedenen Pflanzengattungen nicht dieselben. Bei niederen Grünpflanzen bis einschließlich der Koniferen ist das Licht dazu nicht notwendig, Chlorophyll kann also auch im Dunkeln gebildet werden, während bei den Pflanzen höherer Ordnung dazu stets Licht erforderlich ist. Das Chlorophyll ist eine Magnesium-Eiweißverbindung und hat einige Ähnlichkeit mit dem Blutfarbstoff und dem Atmungsferment. Die von Dunkelpflanzen wie auch von Kümmerformen gebildete Vorstufe, das Chlorophyllogen, ist von gelbgrüner Farbe. Unter dem Einfluß von Rotlicht soll eine Rückbildung des Chlorophylls in diese Vorstufe stattfinden, ebenfalls beim Vorgang des Welkens.

Die Photosynthese der pflanzlichen **Proteine** geht ebenfalls unter Lichteinfluß vor sich. Hier sind vorwiegend die kurzwelligen Strahlen wirksam im Gegensatz zur Kohlehydratsynthese, für welche der Rot-Orangebezirk in Frage kommt. Die Aufspeicherung von Nitraten findet unter allen Belichtungsbedingungen statt, vorwiegend jedoch im Dunkeln. Unter dem Einfluß kurzwelligen Lichtes tritt eine Minderung des Nitratbestandes ein. Wahrscheinlich geht zugleich auf dem Weg über ammoniakalische Verbindungen die Umwandlung in Eiweiß vor sich.

Die bei der Assimilation abgegebene Sauerstoffmenge ist recht beträchtlich. Sie erreicht Werte, die zur restlosen Verbrennung der gesamten assimilierten Substanz ausreichen würden. In Anbetracht der gewaltigen Kohlensäureproduktion durch häusliche und industrielle Verbrennung wie auch durch den Stoffwechsel von Tieren und Menschen ist die assimilatorische Tätigkeit der Pflanzen von größter Bedeutung. Die Pflanze schließt den Kreislauf des Kohlenstoffes unter Ausnützung der Sonnenenergie.

Dafür ist es günstig, daß die Kohlensäure das spezifisch schwerste der atmosphärischen Gase ist und deshalb stets eine Anreicherung am Boden stattfindet.

Zu erwähnen ist endlich wegen ihrer außerordentlichen Wichtigkeit für Mensch und Tier der **Vitaminaufbau** der Pflanzen. Manche Vitamine bildet die Pflanze selbst in aktiver Form, für andere bildet sie nur die Vorstufen, die im tierischen

Organismus dann weiter verarbeitet werden, zum Teil wiederum unter dem Einfluß der Sonnenstrahlung.

Die Strahlenwirkungen auf die Pflanze sind mit diesen Stoffwechselvorgängen noch nicht erschöpft. Bekanntlich wachsen die Pflanzen der Strahleneinfallsrichtung entgegen. Die Erscheinung des Photo- oder Heliotropismus zeigt einen außerordentlich feinen Mechanismus. Durch das Licht wird die Zellteilung im allgemeinen gehemmt (mit Ausnahme des Blütenwachstums). Das Wachstum geht nachts schneller als am Tage vor sich. Aber auch die unbelichtete Seite der Stengel wächst schneller, und so erklären sich die Krümmungen, die zu einer erhöhten Strahlenaufnahme der Blattorgane führen. Offenbar ist das Integral der von jeder Seite wirksamen Strahlung maßgebend, allerdings nur bis zu einem gewissen Grenzwert, jenseits dessen die Erscheinung umgekehrt verläuft. Dadurch entsteht eine gewisse Regulation zur Erzielung der günstigsten Strahlungssummen. Wie weit Wirkungen des durch den Stengel fallenden Spektrums (also das innere Strahlungsklima der lichtabgewandten Stengelpartien) oder Wirkungen des nördlichen Himmelslichtes mitbeteiligt sind, ist noch nicht geklärt.

Dunkelpflanzen haben gewöhnlich lange, schmächtige Triebe. Ob der kurze und dichte Bau der Hochgebirgspflanzen, die zugleich durch die Farbensattheit der Blüten auffallen, durch die intensive Strahlung im Hochgebirge bedingt ist, kann noch nicht als sicher, jedoch als wahrscheinlich angesehen werden. Vermutlich wirken aber noch andere Faktoren mit.

Es gibt aber auch vom Licht hervorgerufene Bewegungen, die nicht an Wachstumserscheinungen gebunden sind. Bei fixierten Zellen können wir sie mit Schwankungen des Gewebsdruckes in Verbindung bringen. Aber auch freibewegliche Zellen führen Bewegungen aus, die zu einer Orientierung führen, bei der die größte Projektionsfläche der Strahleneinfallsrichtung zugekehrt ist. Durch laufende Änderungen der letzteren kann man solche Zellen Serien von Drehungen ausführen lassen. Zu erwähnen sind hier noch tageszeitliche Einflüsse auf die Öffnung und Schließung von Blüten. Die meisten Blüten sind nachts geschlossen, tags geöffnet, während z. B. die „Königin der Nacht" das umgekehrte Verhalten zeigt. Künstliche Änderung des Belichtungsrhythmus ergibt eine entsprechende Umstellung, woraus auf das Licht als maßgebenden Faktor geschlossen werden kann.

c) Strahlungswirkungen auf Tiere

Die tageszeitliche, offenbar in erster Linie mit dem Strahlungsrhythmus zusammenhängende Periodik ist bei Tieren stark ausgeprägt. Es gibt ausgesprochene Dunkeltiere und Lichttiere. Die Wirkung geht vorwiegend über das Auge, speziell über den Farbensinn. Aber auch augenlose Tiere zeigen ausgeprägte phototropische und photophobische Reaktionen, wie z. B. manche Arten von Würmern. Daphnien versammeln sich besonders im gelbgrünen Teil des Spektrums. Frösche reagieren besonders auf blauviolette Strahlung. Bei Krustazeen bestehen ausgeprägte Licht-

reaktionen, ebenso bei manchen Fischen. Tiere, die Metamorphosen durchmachen, reagieren in verschiedenen Stadien in ganz verschiedener Weise auf Strahlung.

Kleine und mittlere Strahlungsintensitäten wirken im allgemeinen anziehend, starke Intensitäten dagegen werden fast stets gemieden.

Bestrahlung führt häufig zu Pigmentierungen, die besonders an gut durchbluteten Bezirken auftreten. Dieser Vorgang ist vorwiegend auf die kurzwellige Strahlung beschränkt, Rotlicht regt die Pigmentproduktion nicht an.

Schnellverlaufende Hautfarbenänderungen im Zusammenhang mit Strahlungseinflüssen sind unter der Bezeichnung „Mimikry" bekannt. Offenbar wirkt dabei nicht nur das direkt einfallende Licht, sondern auch in einer komplizierten Weise die von der Umgebung reflektierte Strahlung schwacher Intensität, die eine Anpassung an die Färbung der Umgebung ermöglicht. Der Vorgang, der am Chamäleon besonders gut zu beobachten ist, beruht auf Kontraktionen und Richtungsänderungen der Pigmentkörperchen der Haut.

Von der Netzhaut des Auges werden nervöse Impulse zum Zentralnervensystem geleitet, von dem dann weitere nervöse Impulse ausgehen. Auf dem Weg über die Hirnanhangdrüse können hormonale Umstellungen erfolgen, denen ein bedeutender Einfluß auf die Periodik der Lebensvorgänge zugeschrieben wird. Fast alle physiologischen Funktionen unterliegen tageszeitlichen Schwankungen. Manche anatomischen Elemente sind direkt lichterregbar. So behalten z. B. isolierte Irisfasern des Frosches noch lange ihre Lichterregbarkeit bei.

Der tierische Stoffwechsel wird weitgehend durch die Strahlung beeinflußt, vielleicht auf dem Weg über die besonders strahlungsempfindlichen Fermente. Bei positiv phototropen Tieren soll die Katalase, bei negativ phototropen die Peroxydase überwiegen. Jedenfalls kommt der Strahlung eine stoffwechselanregende Wirkung zu. Dunkeltiere zeigen eine Verringerung des Organstoffwechsels und eine Zunahme der Aufspeicherung von Reservestoffen. Wahrscheinlich spielen psychische Bewegungsantriebe eine große Rolle dabei, die im Dunkeln stark herabgesetzt sind. Masttiere werden deshalb weitgehend vom Licht abgeschlossen.

Psychisch wirkt die rote Strahlung erregend, bei männlichen Vertretern gewisser Tiergattungen, z. B. beim Stier und beim Truthahn, besonders stark. Dagegen wird der Blaustrahlung eine beruhigende Wirkung zugeschrieben.

9. Der Mensch als Strahlenempfänger

Durch die weitgehende Domestikation ist der Mensch die meiste Zeit seines Lebens den natürlichen Strahlungsvorgängen mehr oder weniger vollständig entzogen. In die Wohnungen dringt, wie wir sahen, nur wenig Sonnen- und Himmelsstrahlung. Die Kleidung läßt nur einen geringen Bruchteil der Körperoberfläche entblößt und läßt selbst nur außerordentlich wenig Strahlung hindurchtreten. Somit wirkt die Kleidung als dichtes Strahlenfilter, das sämtliche Spek-

tralbezirke gleicherweise absorbiert und in Wärme umwandelt. Diese Wärme wirkt sich auf den Energiehaushalt des menschlichen Körpers aus, geht also nicht verloren, während die chemische Wirksamkeit der kurzwelligen Strahlung durch die Kleidung fast völlig abgeschaltet wird.

Im Zeitalter des Sportes werden nun von einem Teil der Bevölkerung von Kindheit auf erheblich größere Strahlungsmengen aufgenommen. Mit dieser Tatsache werden einige auffällige Erscheinungen in Zusammenhang gebracht wie z. B. die seit Jahrzehnten fortschreitende Zunahme der mittleren Körperlänge bei fast allen Völkern, ferner das frühere Einsetzen der Menarche, des Auftretens der ersten Menstruation. Von frauenärztlicher Seite werden diesbezüglich sogar gewisse Bedenken geäußert. Nun hat sich manches in den letzten Jahrzehnten in der Lebensweise der Völker geändert, und wie bei so vielen bioklimatischen Problemen bedarf es zur Sicherung des Strahlungseinflusses auf die genannten Erscheinungen noch anderer Beweise. Auch die Tatsache, daß Geburtsgewicht und -länge der im Herbst Neugeborenen größer ist als der Frühjahrskinder, hilft hier nicht viel weiter, denn der ganze vielverflochtene Komplex der Lebensbedingungen der Mutter ist jahreszeitlichen Verschiebungen unterworfen. Die Strahlung ist nur die sinnfällige Ursache der meisten dieser Verschiebungen.

Die steigende Wertschätzung der natürlichen Heilfaktoren hat auch die Verbreitung der Anwendung des Sonnenbades für Gesunde und Kranke zur Folge gehabt. Wenn auch heute fast jeder Arzt über die heilkräftigen Wirkungen der Sonnenstrahlung unterrichtet ist, so wird doch noch erstaunlich wenig systematischer Gebrauch von diesem Heilmittel gemacht. Vielfach wird nach langer Sonnenlosigkeit plötzlich in sinnloser und schädlicher Weise die Sonnenbestrahlung übertrieben. Man „nützt die Sonne aus", wenn man schon einmal die Möglichkeit der Bestrahlung geschaffen hat, nach dem Grundsatz „viel hilft viel". Dazu trägt die Tatsache der subjektiven Annehmlichkeit des Sonnenbades und die schnell einsetzende wohlige Schlappheit bei, die vorwiegend durch die Kreislaufwirkung der Wärmestauung entsteht. Es kostet eine gewisse Überwindung, unter warmen Bedingungen ein Sonnenbad rechtzeitig abzubrechen und dazu kommt noch das Bestreben, eine möglichst kräftige Hautbräunung hervorzurufen. Da in den Städten noch sehr wenig Gelegenheit für häufige Sonnenbäder gegeben ist, wird trotz theoretischer Kentnisse dieser Dinge teils zu wenig und teils zu viel Gebrauch von der Sonne gemacht. Ohne Zweifel entstehen dadurch mancherlei Schäden. Hier kann nur eine Aufklärung breiter Volksschichten wirksam sein, denn außerhalb der mit Sonnenbehandlung arbeitenden Heilstätten ist die Reichweite ärztlicher Einwirkung in dieser Beziehung meistens gering.

Die Strahlenwirkungen auf den menschlichen Organismus trennen wir zunächst wieder zweckmäßigerweise in Wärmewirkung, d. h. Wirkungen auf den Wärmehaushalt und in solche, die auf Veränderungen des Stoffwechsels der Haut zurückzuführen sind.

a) Strahlenwirkungen auf den Wärmehaushalt

Durch Verbrennung von Nahrungsstoffen im Organismus entsteht Wärme. Die Intensität der Verbrennungsvorgänge, der Oxydationen (ausgedrückt durch das Maß der Kalorie), ist abhängig von Körperlänge und Körpergewicht, von Alter und Geschlecht, sowie von Nahrungsaufnahme, Arbeitsleistungen und den äußeren Wärmebedingungen. Unter Normierung bzw. weitgehender Ausschaltung der drei letzteren Bedingungen erhält man den sogenannten „Grundumsatz", der beim Gesunden sehr genau mit dem aus den ersteren der aufgezählten Bedingungen zu berechnenden „Sollumsatz" übereinstimmt. Offenbar spielt neben den durch Alter und Geschlecht gegebenen hormonalen Einflüssen die Größe der Körperoberfläche eine ausschlaggebende Rolle, denn es ist in ziemlich weiten Grenzen gleichgültig, ob starker Knochenbau, umfangreiches Fettpolster oder Muskulatur sich am Körpergewicht maßgeblich beteiligen.

Wir erhalten in diese Verhältnisse einen besseren Einblick, wenn wir eine Aufteilung der Stoffwechselgrößen vornehmen. Da ist einmal ein nicht zu unterschreitender Betrag an Verbrennungsvorgängen durch die Lebenstätigkeit der Körperzellen gegeben. Das lebende „aktive" Protoplasma ist einer ständigen Umwandlung unterworfen, die sich in Aufbau und Abbau von Nährstoffen äußert. Man kann diesen Anteil „Erhaltungsumsatz" nennen. Dabei wird von jeder Zelle nur soviel Arbeit geleistet, als zur Erhaltung des organismischen Betriebes und ihrer eigenen Lebenstätigkeit unter Ausschaltung äußerer Arbeit notwendig ist. Eine noch sehr umstrittene Frage ist es nun, ob dieser Erhaltungsumsatz kleiner als der Grundumsatz ist und ob also selbst unter behaglichen Bedingungen noch ein bestimmter Energiebetrag zur Erhaltung des Wärmegleichgewichtes geliefert werden muß. Man hat die Entscheidung davon abhängig gemacht, ob unter angenehm warmen Bedingungen der Wärmeumsatz weiter gesenkt werden kann. Diese Senkung, die „zweite chemische Wärmeregulation", wie ein nicht sehr glücklich gewählter Ausdruck besagt, ist nicht sichergestellt. Selbst eine sicher nachgewiesene zeitweilige Senkung der Oxydationen unter äußeren Wärmeeinflüssen wäre nicht beweisend. Wahrscheinlich liegen die Dinge so, daß eine gewisse Mindestdurchblutung der Haut zur Aufrechterhaltung des für den Gesamtkörper so wichtigen Hautstoffwechsels notwendig ist. Die hierfür notwendige Kreislauf- und Stoffwechselarbeit ist von der Oberflächengröße abhängig, und damit findet deren ausschlaggebender Einfluß eine Erklärung.

Nun ist jedoch die Hautdurchblutung keine feststehende Größe, sondern sie unterliegt im Dienste der Wärmeregulation erheblichen Schwankungen. Die Abweichungen von der Durchblutungsnorm stellen auf jeden Fall für den Organismus eine Belastung dar. Längerdauernde, mehrere Stunden währende Einschränkung der Hautdurchblutung bringt eine einseitige Anspannung des Tonus des vegetativen Nervensystems mit sich, der Hautstoffwechsel erfährt eine Einschränkung und

eine qualitative Änderung, die nach einer gewissen Zeit zu Reaktionen führt — u. a. zu Stoffwechselsteigerung des Gesamtkörpers und zu nachfolgender reaktiver Durchblutungssteigerung (die heiße rote Haut nach winterlichem Freiaufenthalt zeigt uns diese Erscheinung). Längerdauernde Steigerung der Hautdurchblutung vermehrt die Kreislaufarbeit des Herzens erheblich, es treten Blutdrucksenkungen auf, die zu Ohnmachtsanfällen führen können. Unter behaglichen Bedingungen, wie sie bei der Untersuchung des Grundumsatzes vorliegen sollen, ist dagegen die Hautdurchblutung auf eine nur geringen Schwankungen unterliegende Norm eingestellt. Es entspricht einem Grundsatz der Wärmeregulation, Abweichungen davon nur in bestimmten, den thermischen Außenbedingungen angepaßten Graden zuzulassen.

Wenn nun ein größerer, der Wärmeregulation dienender Stoffwechselanteil durch Wärmezufuhr von außen wie z. B. durch Sonnenstrahlung ersetzt werden könnte, so müßte bei leichter Bestrahlung eine wesentliche Einschränkung der Oxydationen und eine Herabsetzung der Hautdurchblutung erfolgen. Beides ist n i c h t der Fall. Der Vorschlag, einen Teil der Nahrungszufuhr durch Strahlungsenergie zu ersetzen, also eine teilweise Ernährung mit Sonnenenergie, ist also nicht durchführbar. Jedenfalls ist damit der Grundumsatz nicht wesentlich zu unterschreiten. Das hat nichts mit der Erscheinung zu tun, daß bei heißem Sommerwetter der kalorische Nahrungsbedarf vermindert ist. Die Erschlaffung führt zu einer Einschränkung des Leistungsumsatzes und vor allem besteht eine Abneigung gegen solche Nahrungsstoffe, die eine erhebliche Verdauungsarbeit erfordern wie Fett und Eiweiß oder die — wie das letztere — zu einer „Luxusoxydation" (der spezifisch-dynamischen Wirkung) führen. Deshalb werden leichtverdauliche Kohlehydrate unter diesen Bedingungen bevorzugt.

Um zu einer Vorstellung über das Verhältnis der vom Organismus gelieferten und der durch Sonnenstrahlung zugeführten Wärmemenge zu kommen, wollen wir folgende Berechnung anstellen: Der Grundumsatz eines mittelgroßen Menschen beträgt pro Tag etwa 1700 Kilokalorien. Diese Wärmemenge würde genügen, einen menschlichen Körper fast zweimal pro Tag von Zimmertemperatur auf Körperinnentemperatur zu bringen. Für eine liegende Versuchsperson, die nicht nüchtern ist, müssen wir unter normalen Bedingungen ungefähr 25% mehr ansetzen, also 2125 Kcal pro Tag, was 1,48 Kcal pro Minute entspricht. Nehmen wir die geometrische Oberfläche mit 17000 cm² an, so müssen wir die für die Wärmeabgabe maßgebliche Oberfläche wesentlich kleiner ansetzen, da die auf der Unterlage liegende Hautfläche bei einigermaßen guter Wärmeisolierung der Unterlage keine nennenswerte Wärmemenge abgibt, ebensowenig sich berührende Hautflächen. Auch einander zugekehrte Hautflächen strahlen sich gegenseitig an und verlieren deshalb weniger Wärme. Tatsächlich sind also nur etwa 50% der geometrischen Oberfläche einzusetzen, also 8500 cm² (Halbkugelprojektionsfläche). Für die Sonneneinstrahlung ist die Projektionsfläche auf die Ebene einzusetzen, die

je nach Lage des Körpers zum Strahleneinfall einen wechselnden Anteil an der Gesamtoberfläche betragen kann. Bei senkrechtem Strahleneinfall auf die breite Vorderseite des Körpers (also bei Schräglage) kann maximal $^1/_3$, bei sehr schrägem Strahleneinfall $^1/_{10}$ angesetzt werden. Bei hohem Sonnenstand wird häufig $^1/_4$ tatsächliche Strahlungsfläche vorliegen, also derselbe Betrag, der für die Kugel gilt.

Für mittlere und starke Sonnenstrahlung können wir mit Intensitäten von 1,0 bis 1,5 cal pro Quadratzentimeter und Minute rechnen. Davon werden gleich 35 % reflektiert, für die Absorption bleiben also 0,65 bzw. rund 1,0 cal cm^{-2} min^{-1}. Mit diesen Größen können wir nun die Rechnung leicht durchführen.

Die Gesamtwärmeabgabe pro Einheit maßgebender Oberfläche beträgt also in der Minute 1480 : 8500 = 0,174 cal/cm^2min. Davon entfallen nach eingehenden Messungen im Mittel auf die Haut 0,160 cal/cm^2min, entsprechend 1360 cal für den Gesamtkörper. Davon wiederum werden 0,135 cal pro cm^2 auf trockenem Wege abgegeben und durch Wasserverdunstung 0,025 cal/cm^2. Die von der Sonne eingestrahlten Wärmemengen ergeben wesentlich mehr, bei steilem Einfall ein Vielfaches des eigenen Wärmeumsatzes. Nachstehende Tabelle gibt eine Übersicht für die verschiedenen Projektionsflächenanteile.

Tabelle III.

Projektionsflächenanteil für Sonne .... Einstrahlungsfläche effektiv	$^1/_3$ 5660 cm^2	$^1/_4$ 4250 cm^2	$^1/_{10}$ 1700 cm^2
Wärmesumme bei 1,5 cal Intensität.......... Wärmesumme bei 1,0 cal Intensität..........	5,5 Kcal/min 3,7 Kcal/min	4,15 Kcal/min 2,75 Kcal/min	1,65 Kcal/min 1,10 Kcal/min
gegenüber eigen. Wärmeumsatz v. 1,36 Kcal/min	das 4,0 fache bzw. 2,7 fache	das 3,1 fache bzw. 2,0 fache	das 1,2 fache bzw. 0,8 fache

Hier setzt nun die Wärmeregulation ein. Die trockene Wärmeabgabe durch Abstrahlung und Leitung ist nicht sehr steigerungsfähig. Sie ist proportional der „Übertemperatur", der Differenz zwischen Haut und Luft, die bei Zimmerbedingungen 33° − 20° = 13° beträgt. In der Sonne ist die Temperatur der umgebenden Luft meist höher, die Hauttemperatur kann kaum um denselben Betrag erhöht werden, die Übertemperatur und damit die trockene Wärmeabgabe wird eher kleiner sein, soweit nicht bei klarem Himmel die langwellige Abstrahlung des Körpers einen Ausgleich schafft. So muß das wirksamste Mittel zur Steigerung der Wärmeabfuhr von der Haut eingesetzt werden: die Steigerung der Hautwasserabgabe, d. h. das Schwitzen.

Die Bedeutung der Hautwasserabgabe für den Wärmehaushalt geht aus der Tatsache hervor, daß die Verdunstung von einem Gramm Wasser rund 0,58 Kcal bindet (bei mittlerer Hauttemperatur). Die oben für die Wärmeeinstrahlung der Sonne errechnete Zahl von 5,5 Kcal könnte also durch Verdunstung von 5,5 zu 0,58 = 9,5 g Wasser in der Minute restlos ausgeglichen werden. Die Schweiß-

drüsen der Haut sind zu einer solchen Leistung befähigt, wir können im Heißluftraum bei 65° einen Gewichtsverlust von 10 bis 15 g in der Minute messen. Doch verdunstet tatsächlich nicht die gesamte Schweißmenge, vielmehr tropft ein erheblicher Teil einfach ab, ohne damit der Wärmeregulation nutzbar zu sein. Wieviel die nasse Haut verdunsten kann, hängt entscheidend von dem Wasserdampfdruck und der Bewegung der umgebenden Luft ab. Bei geringer Luftbewegung und mittlerem Dampfdruck können von der nassen Haut ungefähr 5 g pro min verdunstet werden. Mehr als naß kann die Haut nicht sein, was an Schweiß mehr produziert wird, tropft ungenützt ab. Die Verdunstung von 5 g kann also nur 2,9 Kcal pro Minute abführen, der Rest von 2,6 Kcal wird den Körper langsam aufwärmen.

Dabei interessiert uns noch die Wirkung einer solchen Aufwärmung auf die Körpertemperatur. Die mittlere spezifische Wärme des menschlichen Körpers beträgt etwa 0,83, d. h. zur Erwärmung des Körpers um 1° C werden pro Kilogramm Körpergewicht 0,83 Kcal benötigt. Für einen 65 kg schweren Körper gibt das 54 Kcal pro Grad. Würde nun die gesamte eingestrahlte Wärmesumme aufgespeichert, so erführe die Körpertemperatur in 10 Minuten eine Steigerung um 1°. Die oben berechnete Restwärme von 2,6 Kcal wird also ungefähr den halben Effekt haben, etwa 0,5° in 10 Minuten.

Diese Daten stimmen weitgehend mit den praktischen Erfahrungen in gedeckten Liegehallen überein. Derartig große Strahlungsintensitäten sind bei Windstille bedenklich. Der Kreislauf wird außerordentlich belastet, das Herz stark beansprucht, ein großer Teil des Blutes befindet sich in der Haut und dem subkutanen Blutgefäßnetz. Der Blutdruck sinkt, die Eingeweide sind schlecht durchblutet. Beim Aufstehen versagt die Kreislaufregulation und es besteht Neigung zu Ohnmachtsanfällen. Es handelt sich dabei um die Vorstufe des *Hitzschlages*, bei dem noch Bewußtlosigkeit hinzutritt.

Nach Tab. III kann der Körper eben noch mit Strahlungsintensitäten von 1,0 cal pro cm² und min bei Windstille fertig werden. Darüber muß durch Luftbewegung für eine Steigerung der Verdunstung gesorgt werden. Besonders bei Kreislaufgeschädigten ist große Vorsicht am Platze. Lungentuberkulöse sind ebenfalls sehr empfindlich gegen Überwärmung. Eine direkte Besonnung wird bei ihnen deshalb von fast allen Ärzten vermieden, wir werden noch auf dieses Problem zurückkommen.

Wie verhalten sich nun die Hauttemperaturen? An direkt bestrahlten und weniger gut durchbluteten Hautstellen können Hauttemperaturen bis über 40° beobachtet werden. Experimentell sind durch Strahlenkonzentration Temperaturen bis fast 45° erzeugt worden.

Bei der Bestrahlung einzelner Hautstellen können natürlich größere Strahlungsintensitäten ertragen werden; zwischen 1,5 und 2,0 cal pro cm² und min. tritt ein stechender Schmerz auf, der von einer ungleichmäßigen Rötung, dem Reflex-

erythem, begleitet ist. Wärmeverbrennungen im eigentlichen Sinne, nämlich Blasen- und Schorfbildung werden durch die natürliche Sonnenstrahlung nie hervorgerufen.

b) Die Strahlenreflexion der Haut

Wir haben oben bei der Berechnung der vom Körper aufgenommenen Strahlungssummen einen Abzug von 35% für die Reflexion an der Hautoberfläche eingesetzt. Dieser Betrag gilt nicht für alle Spektralgebiete im einzelnen, sondern für die gesamte Wärmeeinstrahlung der Sonne mit ihrer natürlichen Spektralverteilung. Für andere Strahlungsquellen mit abweichender spektraler Zusammensetzung gelten andere Reflexionszahlen. Ferner spielen gewisse Eigenschaften der Haut eine Rolle für ihre Reflexfähigkeit. Wie mit dem Auge zu erkennen ist, bestehen im sichtbaren Gebiet individuelle Unterschiede je nach Pigmentation und Weite der oberflächlichen Hautblutgefäße. Der Farbton der Haut beruht hauptsächlich auf dem Verhältnis zweier umschriebener Spektralgebiete, nämlich einmal im Grünblau (bis etwa 500mμ) und ferner im Rot (bis etwa 630 mμ), bei denen die Reflexionskurve Maximalwerte annimmt. Das rote Maximum liegt durchweg höher als das blaugrüne. Bei sehr blasser Haut sind diese beiden Maxima fast gleich hoch, die ganze Kurve liegt wesentlich höher. Auch bei stärkerer Bräunung (Pigmentierung) sind die Unterschiede ausgeglichener, die Kurve zeigt im ganzen einen Tiefstand. Im Sichtbaren kann die Reflexion bei blasser Haut Werte bis über 60% annehmen, bei stark gebräunter Haut bis unter 15%. Bemerkenswert ist, daß bei Hautrötung die Rotreflexion fast normal ist, dagegen die Blaugrünreflexion wesentlich herabgesetzt ist. Danach beruht die Rötung der Haut nicht auf einem Röterwerden, sondern auf einer Farbentmischung im Sinne eines Zurücktretens des Blaugrün (s. Abb. 3).

Abb. 3. Reflexionskurven der Haut nach Bode
I = blasse Haut
II = gerötete Haut
III = gebräunte Haut

Im Ultraviolett wie auch im Ultrarot ist die Reflexionsfähigkeit der Haut wesentlich geringer. Im Ultraviolett beträgt sie wahrscheinlich nicht viel mehr als 1%, eine für biologische Fragen wichtige Feststellung. Im inneren (an das Sichtbare anschließenden) Ultrarot sind die Reflexionsverhältnisse noch nicht genügend geklärt, im äußeren Ultrarot, das für die Abstrahlung wichtig ist, beträgt die Reflexion nach neueren Untersuchungen ungefähr 5%. Wir erwähnten bereits die Bedeutung der „Schwärze im Ultrarot" für den Wärmehaushalt. Für die gesamte Wärmestrahlung der Sonne beträgt die Reflexzahl wie erwähnt im Mittel 35%, für helle Haut etwa 30%, für dunkle Haut etwa 40–45%.

Wir ersehen aus diesen Tatsachen, daß körpereigene Bedingungen das Strahlungsklima der Haut selbst beeinflussen können. Es ist nun reizvoll, die Auswirkungen dieser Verhältnisse zu untersuchen. Wir sind gewohnt, Erscheinungen auf ihre Zweckmäßigkeit hin zu betrachten, da wir eine große Zahl fein entwickelter Schutz- und Regulationsmaßnahmen des Körpers kennen. Solche Versuche haben gerade bei den Strahlungsverhältnissen der Haut einen besonderen Reiz gehabt, aber manchmal ist über das Ziel hinausgegangen worden und manche Erscheinungen haben eine falsche Auslegung gefunden. So wurde z. B. die weiße Fellfarbe des arktischen Eisbären als besonders zweckmäßig angesehen, weil die Abstrahlung dabei niedrig und so eine Wärmeersparnis gewährleistet sei. Das ist nun nicht der Fall. Weißes Fell oder weiße Haut hat dieselbe Abstrahlungszahl wie die entsprechenden dunklen Gewebe, und die Farbe des Eisbären kann deshalb nur als Schutzfarbe im Sichtbaren angesehen werden. Alle organischen Substanzen haben eine hohe Abstrahlungszahl und damit ist gerade diejenige Größe, die auf der negativen Seite des Wärmehaushaltes die größte Rolle spielt, nicht abstufbar. Dafür kann durch Variation der Felldicke und der Felldurchfeuchtung der Wärmestrom weitgehend beeinflußt werden. Merkwürdig ist auch die Tatsache, daß der in sehr strahlungsreichen Klimaten lebende Neger eine geringere Hautreflexion hat als der in strahlungsarmen Klimaten höherer geographischer Breiten lebende Mensch. Für den letzteren ist jeder Sonnenstrahl ein Geschenk, von dem seine Haut jedoch weniger annimmt als die des Negers, der auf Strahlungsabwehr eingestellt ist. Eine um 20% größere Hautreflexion des Negers würde dessen Wärmeregulation erheblich entlasten. Die Ausnützung steht zum Angebot also im direkten und nicht wie zu erwarten im umgekehrten Verhältnis.

c) Die Strahlendurchlässigkeit der Haut

Der nach Abzug des Reflexionsverlustes verbleibende Betrag der Strahlung wird in den Geweben des menschlichen Körpers absorbiert. Nur ganz außerordentlich geringe Mengen durchdringen den Körper an dünnen Stellen wie z. B. den Ohrmuscheln. Fast der gesamte absorbierte Energiebetrag wird in Wärme umgewandelt. Die Durchlässigkeit der Gewebe für verschiedene Spektralbereiche unterliegt großen Unterschieden, ebenso verhalten sich verschiedene Gewebe nicht in gleicher Weise. Die Durchlässigkeit der Gewebe oder umgekehrt ausgedrückt die Durchdringungsfähigkeit der Strahlen verhält sich bezüglich der verschiedenen Spektralbereiche im wesentlichen umgekehrt als bei den Reflexionsverhältnissen. Die wenig reflektierten Spektralbezirke, Ultraviolett und Ultrarot dringen wenig tief ins Gewebe ein, werden also schon in den oberflächlichen Hautschichten absorbiert. Am tiefsten dringen die sichtbaren Strahlen ein und von diesen wiederum die Rotstrahlen.

Für den Sehakt sind diese Verhältnisse günstig, weil die zum Sehen benützten Strahlen nicht unbeträchtliche Gewebsschichten durchdringen müssen, ehe sie an

die Netzhaut des Auges gelangen. Hornhaut, Kammerflüssigkeit, Linse und Glaskörper sind für die sichtbaren Strahlen gut durchlässig, und normalerweise ist auch nur eine ganz geringe Streuung und diffuse Reflexion vorhanden. Erst am Augenhintergrund findet eine plötzliche Absorptionssteigerung statt. Im Gegensatz dazu liegen die Verhältnisse an der Haut derart, daß in den obersten Schichten immer der größte Energiebetrag gebunden wird — gleichgültig um welchen Spektralbereich es sich handelt. Es ist bis jetzt nicht gelungen, überzeugend nachzuweisen, daß in irgendeiner Zwischenschicht absolut höhere Energiebeträge zur Absorption gelangen. Andrerseits ist aber der Verlauf des Temperaturgefälles für verschiedene Strahlenarten recht verschieden. Je stärker die Durchdringung, desto geringer das Gefälle. Die Bedeutung dieser Tatsache liegt darin, daß die Oberhaut ein sehr differenziertes und empfindliches Gebilde ist im Gegensatz zum Unterhautzellgewebe. Man kann die Haut als ein Drüsenorgan mit innerer Sekretion betrachten. Offenbar spielt die Haut bei der Bildung von Abwehrstoffen bei Infektionskrankheiten eine wichtige Rolle. Das Nervengeflecht der Haut vermittelt ferner sensible Reize und löst tiefgreifende reflektorische Vorgänge im Stoffwechselgeschehen aus. Ferner erfolgt die Bildung des wichtigen Vitamin D in der Haut. Histaminähnliche Substanzen werden in Hautzellen in Freiheit gesetzt und gelangen auf dem Weg über den Kreislauf in den Organismus. Es kann somit nicht gleichgültig sein, in welchen Schichten die Energie einzelner Spektralbereiche in der Hauptsache stecken bleibt.

Abb. 4. Strahlungsklima der Haut (nach Bachem)

Wir haben bereits darauf hingewiesen, daß die chemische Struktur der in den einzelnen Hautschichten vertretenen Substanzen weitgehend für die Durchlässigkeits- und Absorptionsverhältnisse maßgebend ist. Die biologischen Strahlenwirkungen hängen damit von drei Faktoren ab: erstens von den spektralen Intensitäten der einfallenden Strahlung, wobei zweckmäßig der Reflexionsbetrag schon in Abzug gebracht wird, zweitens von dem Ausmaß der den empfindlichen Schichten vorgelagerten Filtersubstanzen (degenerierte Zellen, Pigmente), und drittens von der chemischen Zusammensetzung der empfindlichen Zellschichten. Für die Ultraviolettstrahlung kommen hauptsächlich zwei Eiweißkörper in Betracht, vor allem das Tyrosin in dem alkalischen Milieu der Haut, ferner eisenhaltige Histidinverbindungen. Diese Eiweißkörper haben isoliert fast dieselbe selektive Absorption wie wir sie von der Haut kennen.

Über die Durchlässigkeit der menschlichen Haut in ihren verschiedenen Schichten gibt Tabelle IV einen Einblick. Die kurzwelligen Strahlen werden schon in der obersten Hautschicht, der Hornschicht (stratum corneum) zum weitaus größten

Teil zurückgehalten, während diese für sichtbares Licht recht gut durchlässig ist. Das Maximum der Durchlässigkeit liegt im Gelbgrün bei 550 mμ mit 87%. Mit der Durchlässigkeit der Hornschicht ist das Strahlungsklima der darunter liegenden Keimschicht (stratum germinativum Malpighii) gegeben. Abbildung 4 veranschaulicht diese Verhältnisse.

Tabelle IV.

Durchlässigkeit der menschlichen Haut (nach Bachem)

Hautschicht	Meßtiefe in mm	Spektralbezirk in mμ								
		200	250	280	300	400	550	750	1000	(1400)
Einfallende Intensität		100	100	100	100	100	100	100	100	100
Hornschicht	0,3	0	19	15	34	80	87	78	71	44
Keimschicht	0,5	0	11	9	16	57	77	65	65	28
Lederhaut	2,0	0	0	0	0	1	5	21	17	8
Unterhautgewebe	25	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Die Zahlen geben an, wieviel Prozent der einfallenden Intensität an der Unterfläche der angegebenen Hautschichten noch vorhanden sind. Da ein Teil der einfallenden Intensität schon an der Oberfläche durch Reflexion verlorengeht, ist die wirkliche Durchlässigkeit der Haut größer, insbesondere im Gelbrot.

Erst in der Lederhaut (corium) liegt das Durchlässigkeitsmaximum im Rot bei 750 mμ. Die einzelnen Schichten sind nun sehr verschieden dick. Die Dicke der Hornschicht betrug in dem untersuchten Fall 0,3 mm, der Keimschicht 0,2 mm, der Lederhaut 1,5 mm und des Unterhautgewebes 23 mm. So ist es verständlich, daß im Sichtbaren die dicke Lederhaut viel mehr absorbiert als die dünne Horn- oder Keimschicht. Berechnen wir jeweils für $^1/_{10}$ mm Schichtdicke die Absorptionszahl bezüglich der in diese Schicht einfallenden Intensität, so ergibt sich eine bemerkenswerte Übereinstimmung der verschiedenen Hautschichten besonders im Sichtbaren. Überraschend ist der Befund, daß der Betrag für die Hornschicht nicht höher liegt, obgleich der, wie oben gezeigt, nicht unerhebliche Reflexionsbetrag inbegriffen ist. Demnach wäre die Absorption der Hornschicht für sichtbare Strahlen geringer als die der andern Hautschichten. Durch das Unterhautgewebe tritt nur im Rot noch eine geringe Strahlenmenge hindurch, doch ist die Absorption auf den Millimeter Schichtdicke berechnet viel geringer als bei den eigentlichen Hautschichten. Vielleicht hängt dies mit der Eiweißarmut und dem Fettreichtum des Unterhautgewebes gegenüber den andern Hautschichten zusammen.

Wichtig für das Folgende ist der Befund, daß im erythemwirksamen Ultraviolett die Reflexion der Haut gering ist und daß fast der gesamte Betrag in der Horn- und Keimschicht absorbiert wird. Daß Kleiderstoffe diese Strahlung nur nach Maßgabe der Porengröße durchlassen, wurde bereits erwähnt.

10. Ultraviolettwirkungen

a) Die Erythemwirkung

Ein bestimmter Bezirk des ultravioletten Spektrums um 300 mμ vermag ohne Wärmewirkung eine Hautrötung hervorzurufen. Diese tritt erst nach einer Latenzzeit auf im Gegensatz zum Wärmeerythem und ist auch nicht so flüchtig wie das letztere. Die Latenzzeit beträgt im Mittel 1 bis 2 Stunden, sie ist nach Sonnenbestrahlung erfahrungsgemäß kürzer als nach Quarzlampenbestrahlung, bei der sie bis zu 7 Stunden betragen kann. Das Sonnenerythem dauert 1 bis 3 Tage an und pflegt dann in Pigmentierung (Bräunung) überzugehen. Sein Ablauf ist gelegentlichen Schwankungen unterworfen und weist individuelle Eigentümlichkeiten auf. Wir haben hier den 1. Grad der „Verbrennung" vor uns. Die befallenen Partien sind sehr empfindlich gegen Wärmestrahlung sowie gegen Dehnung und Berührung. Auffallend ist das in vielen Fällen auftretende gänsehautähnliche Aussehen, das wahrscheinlich auf kleinen Ödembildungen beruht. Die Hauttemperatur ist gesteigert und damit die Wärmeabgabe vermehrt, hingegen die Oberflächenfeuchte vermindert. Das Allgemeinbefinden ist in Form eines eigenartigen Unbehaglichseins gestört. Nicht selten tritt eine Steigerung der Körpertemperatur auf. Bei stärkeren Rötungsgraden kommt es nach einigen Tagen zu einer Abschuppung der Haut in größeren oder kleineren Fetzen.

Die Schuppung bildet den Übergang zum 2. Grad des Sonnenbrandes, der Blasenbildung. Aus den Blutgefäßen der Haut tritt Flüssigkeit aus, die sich in Blasen sammelt und die Epidermis abhebt, bei empfindlichen Personen unter Umständen in großen zusammenfließenden Blasen. Diese heilen nach wenigen Tagen ohne Hinterlassung von Narben ab, doch treten gelegentlich Pigmentierungsstörungen in Form großfleckiger Sommersprossen auf.

Das wirksame Spektralgebiet beginnt nach den heutigen Anschauungen bei 313 mμ. Nach den kürzeren Wellenlängen hin steigt die Wirksamkeit rasch an und erreicht zwischen 303 und 297 mμ das Maximum, also gerade in jenem Gebiet, das nur unter günstigen Bedingungen zur Erdoberfläche gelangt. Unterhalb dieses Spektralgebietes sinkt die Wirksamkeit wieder ab, erreicht bei 280 mμ ein Minimum und steigt bei 250 mμ wieder an, doch kommen diese Gebiete für die natürliche Strahlung nicht in Frage. Die natürlichen Erytheme unterscheiden sich von dem durch kurzwellige Strahlen hervorgerufenen in einigen Punkten: die ersteren erreichen einen tieferen Farbton und klingen langsamer ab. Ob sie auch langsamer entstehen, ist durch neuere Untersuchungen in Frage gestellt. Schon geringere Steigerungen der Strahlendosis bewirken eine relativ stärkere Reaktion, weshalb die Dosierung des natürlichen Ultravioletts vorsichtiger gehandhabt werden soll.

Von dem Wesen der Erythembildung haben wir heute folgende Vorstellung: Die wirksamen Strahlen lösen zwei zeitlich und wesentlich verschiedene Mecha-

nismen aus. Einmal wird in der Hornschicht befindliches Histidin photochemisch in Histamin umgewandelt. Letzteres wandert zu den oberflächlichen Blutgefäßen der Haut und bewirkt eine Gefäßerweiterung, die sich als Rötung bemerkbar macht. Dieser Prozeß geht verhältnismäßig schnell vor sich. Daneben läuft ein zweiter Vorgang ab, indem in der Keimschicht durch die Absorption wirksamer Strahlen Zellschädigungen aufgetreten sind, die sich langsamer auswirken, schließlich aber ebenfalls zur Bildung gefäßerweiternder, histaminähnlicher „H-Substanzen" führen. Die Gefäßwirkung dieser letzteren ist intensiver und der ganze Prozeß läuft in Verbindung mit dem Zellstoffwechsel langsamer ab.

Damit sind mancherlei Erscheinungen zu erklären. Wie aus Tabelle IV ersichtlich, wird von den kurzwelligen UV-Strahlen in der Hornschicht ein größerer Prozentsatz absorbiert als von den langwelligeren, so daß der eine oder andere der beschriebenen Mechanismen vorherrschen kann. Eine sehr dicke Hornschicht absorbiert die wirksamen Strahlen schon in den oberflächlichsten Schichten, die Histamindiffusion ist dadurch erschwert und verlangsamt. Das hat zur Folge, daß das Histamin der Zerstörung anheimfällt, bevor es in wirksamen Konzentrationen an die Blutgefäße herankommt. Wahrscheinlich spielt auch der Histidingehalt der Haut sowie der Gehalt an histaminzerstörenden Substanzen eine Rolle. Jedenfalls wurden uns dadurch die großen individuellen Unterschiede und zeitlichen Schwankungen der Erythemempfindlichkeit verständlich.

b) Der natürliche Erythemschutz

Es ist eine bekannte Tatsache, daß im Verlaufe wiederholter Sonnenbestrahlungen die Erytheme abgeschwächt verlaufen oder überhaupt nicht mehr auftreten. Die Herabsetzung der Erythemwirkung kann schon wenige Stunden nach der Bestrahlung beginnen – mit dem Maximum am neunten Tag und einer Dauer von drei bis sechs Wochen.

Nach dem oben Gesagten können wir folgende Erklärung für diese Schutzwirkung heranziehen: Entweder werden die erythemwirksamen Stoffe in der Haut infolge einer qualitativen oder quantitativen Änderung des Hauteiweißbestandes nicht mehr gebildet. Man hat eine „Denaturierung" von Eiweißkörpern durch Bestrahlung im Reagenzglas nachweisen können. Oder es sind die histaminabbauenden Substanzen in größerer Menge vorhanden, was ungefähr gleichbedeutend mit dem Vorhandensein von spezifisch gegen die Entzündung gerichteten „Antikörpern" wäre, und wohl ebenfalls verwandt mit der Annahme einer geringeren Empfindlichkeit der Blutgefäße. Vielleicht ist die Wirkung der meistens mit dem Erythemschutz zeitlich zusammenfallenden Pigmentwanderung in oberflächlichere Hautschichten weniger physikalisch durch Filterwirkung zu erklären als chemisch durch eine Änderung des Reaktionsablaufes. Wahrscheinlich trägt eine Verdickung der Hornschicht, wie bereits erwähnt, erheblich zum Erythemschutz bei. Wir dürfen vermuten, daß in praxi eine Kombination dieser verschiedenen

Mechanismen vorliegt, die es erklärlich macht, daß beim Ausfall einer Schutzwirkung — zum Beispiel bei pigmentlosen Albinos — trotzdem Lichtschutz auftreten kann. Erwähnt sei, daß es auch in beschränktem Maße eine indirekte Schutzwirkung von bestrahlten auf unbestrahlte Hautgebiete gibt.

c) Der künstliche Erythemschutz

Erythemschutzmittel sind heutzutage stark gefragt, weil bei unserer modernen Lebensweise ein Erwerb des natürlichen Erythemschutzes oft schwierig ist. Das Ziel ist die Möglichkeit, plötzlich ohne Schaden langdauernde Sonnenbäder nehmen zu können unter Erwerb eines reichlichen Pigmentes. Solche Mittel können auf ganz verschiedene Weise wirken. Einmal kann die Reflexion, die ja bei der Haut selbst im UV ganz gering ist, gesteigert werden, ferner die diffuse Zerstreuung der wirksamen Strahlen. Weiterhin kann ein Absorptionsmittel für diese Strahlen auf die Haut gebracht werden und endlich kann die Haut selbst im Sinne einer Reaktionsminderung beeinflußt werden. Auf erstere Weise wirken Puder oder Ölemulsionen. Als stark absorbierende Chemikalien kennen wir Äskulin, ein aus Roßkastanien gewonnenes Alkaloid, dessen Abkömmlinge in den Zeozonsalben enthalten sind. Ferner kommt Tannin und Chinin sowie Naphtol—disulfosaures Natrium als Salbenzusatz in Frage.

Die Vielzahl der empfohlenen Mittel und der Streit der Meinungen weisen darauf hin, daß es kaum ein für alle Menschen sicher wirkendes Mittel gibt. Die „Schmiererei" hat auch eine Reihe von Nachteilen, vor allem den Ansatz von Staub und Sand, der zu mechanischer Beeinträchtigung der Haut führen kann, ferner eine vielleicht nicht unbeträchtliche wärmestauende Wirkung der Salben und Öle. Tannin- und Salizylspiritus vermeiden zwar diese Nachteile, lassen aber eine Gerbung der Haut befürchten. Innerliche Mittel, Resorzin, Brenzkatechin, Atophan und Kalk kommen wohl nur für die Behandlung krankhaft gesteigerter Lichtempfindlichkeit in Frage.

d) Unterschiede der Erythemempfindlichkeit

Durch abgestufte Bestrahlung kleiner Hautfelder kann die Erythemempfindlichkeit experimentell in einem einzeitigen Verfahren geprüft werden. Als Maß dient entweder der Rötungsgrad nach Anwendung einer bestimmten Strahlenmenge oder der Erythemschwellenwert, d. h. die Feststellung derjenigen Strahlenmenge, die eben noch ein deutliches Erythem hervorbringt. Auf diese Weise wurden Tausende von Prüfungen vorgenommen. In der Praxis der Heliotherapie wird ein anderes Verfahren angewandt, indem zunächst kurzzeitig und dann von Tag zu Tag länger bestrahlt wird. Manche Ärzte beginnen zunächst nur mit einer Teilbestrahlung.

Die wissenschaftliche Erforschung der Bedingungen verschiedengradiger Erythemempfindlichkeit geht unter der Bezeichnung „lichtbiologische Konstitutions-

forschung". Leider wurde zu solchen Untersuchungen fast ausschließlich die Quecksilberdampflampe (künstliche Höhensonne) benutzt. Nach dem, was oben über die Erythementstehung gesagt wurde, ist es kaum wahrscheinlich, daß diese Ergebnisse ohne weiteres auf die Verhältnisse bei natürlicher Sonnenstrahlung übertragen werden können. Qualitativ liegt jedoch eine Übereinstimmung mit den praktischen Erfahrungen der Heliotherapie vor. Danach sind hauptsächlich vier Faktoren maßgebend: Haarfarbe, Lebensalter, Geschlecht, Jahreszeit.

Blondhaarige Personen zeigen sich um 40 bis 170% empfindlicher als dunkelhaarige, Rot- und Hellblonde wiederum mehr als doppelt so empfindlich wie die Dunkelblonden.

Kinder, selbst Neugeborene, haben eine geringe Empfindlichkeit, die bei letzteren auf eine erheblich dickere Hornschicht zurückgeführt werden kann. Zu Beginn der Pubertät findet eine Steigerung statt, im Greisenalter eine erhebliche Herabsetzung gegenüber dem geschlechtsreifen Alter. Frauen sind im Jahresmittel um ungefähr 20% unempfindlicher als Männer.

Abb. 5. Jahreskurve der Erythemempfindlichkeit (nach Ellinger)

Über die jahreszeitliche Kurve der Erythemempfindlichkeit gibt Abbildung 5 Auskunft. Wenn man von kleineren Unterschieden absieht, die vielleicht zufälliger Art sind, so ergibt sich für die Monate Oktober bis Mai, also für 8 Monate, eine sehr gleichmäßige, hohe Empfindlichkeit. Von Juni bis September ist sie wiederum mit sehr geringen Schwankungen um 30% herabgesetzt. Danach könnte man die Annahme einer besonderen, gleichmäßigen Sommerempfindlichkeit machen – gegenüber einer ebenso gleichmäßigen Empfindlichkeit für das übrige Jahr. Doch zeigen andere Untersuchungen einen gradlinigen Abfall von März bis September. Ausgeprägt ist offenbar ein sprunghafter Anstieg im Oktober, der vielleicht am besten mit einer „Mauserung" der Haut infolge der Umstellung der Lebensweise beim Übergang zur kühleren Jahreszeit erklärt werden kann. Ob auch bei Ausschaltung sommerlicher Bestrahlungen eine ausgeprägte Jahreskurve besteht, wäre einer Untersuchung wert, da daraus interessante Schlüsse auf das Wesen der Erythemempfindlichkeit gezogen werden könnten.

Die Rasse scheint entgegen der landläufigen Meinung nur einen geringen Einfluß auf die Empfindlichkeit zu haben. Juden und Japaner entsprechen dabei durchaus dunkelhaarigen Ariern. Nur die Neger zeigen eine stark herabgesetzte Empfindlichkeit, sie brauchen die zehnfache Dosis zur Erzeugung eines Erythems.

Die erwähnten Verhältnisse lassen sich bis jetzt auf hautkonstitutionelle Ein-

flüsse und auf solche verschiedengradiger Bestrahlung in den der Untersuchung vorhergehenden Wochen zurückführen. Es gibt aber auch plötzliche Empfindlichkeitssteigerungen beim gleichen Individuum, so vor allem am ersten Tag der Menstruation und während der Schwangerschaft, ferner im Gefolge von Störungen des vegetativen Nervensystems. Ein besonderer Typ von Nervösen, die Basedowoiden und vegetativ Stigmatisierten, zeigen überhaupt eine enorme Erhöhung der Erythemempfindlichkeit. Sie ist ferner erhöht bei einer Reihe von Krankheiten wie Ekzem, Lues I, Gonorrhoe, florider Rachitis, aktiver Tuberkulose.

Chronische Hautreize jeglicher Art setzen die Empfindlichkeit herab, während akute Reize während des Strahlungseinflusses meistens eine Erhöhung bedingen, z. B. Massage, Bürsten, Schmierseifeneinreibung, Wasseranwendung und anderes. Endlich sei der Einfluß der Ernährung erwähnt, der vielleicht auch an der jahreszeitlichen Kurve der Empfindlichkeit beteiligt ist. Saure Kost (Fleisch, Hafer, Einnahme von Salmiak) bewirkt eine Steigerung, alkalische Kost (Vegetabilien) eine Herabsetzung. Bei der Strahlenbehandlung des Lupus wurde versucht, durch Umstellung auf eine saure Stoffwechsellage und die damit verknüpfte Erhöhung der Strahlenempfindlichkeit die Behandlungserfolge zu steigern. In ähnlicher Weise wurde bei anderen Krankheiten versucht, durch Lichtsensibilisatoren wie z. B. Eosin, stärkere Reaktion zu erzeugen.

e) Klimatische Einflüsse auf die Erythemempfindlichkeit

Bei der Aufzählung der die Erythemempfindlichkeit beeinflussenden Faktoren fanden mehrmals Bedingungen Erwähnung, die mit klimatischen Gegebenheiten im Zusammenhang stehen. Vor allem sind es die zur Verfügung stehenden Strahlungssummen, die sich beim Durchschnitt der Bevölkerung geltend machen werden, also sowohl die Intensität der wirksamen Strahlung als auch die Strahlungsdauer. Der Jahreszeiteneinfluß gehört hierher. Wenn wir aber bedenken, wie stark die Kleidung die Strahlenaufnahme beeinflußt, so ist es klar, daß die allgemeinen Klimaverhältnisse ebenfalls Beachtung finden müssen. Denn die Bestrahlung größerer Hautpartien ohne Bekleidung hängt wesentlich von den thermischen Klimafaktoren ab, die ein Ablegen der Kleidung gestatten oder nahelegen. Hier spielen auch noch anderweitige Anreize zum Ablegen der Kleidung eine Rolle, z. B. das Badeleben an Flüssen, Seen und besonders am Meeresstrand. Dieser Umstand wird bei bioklimatischen Betrachtungen über die Strahlung fast stets vergessen und doch ergibt eine einfache Rechnung, daß ihm das Vielfache an Bedeutung gegenüber den strahlungsklimatischen Unterschieden zukommt.

Es hat sich gezeigt, daß man nicht berechtigt ist, aus der Beobachtung stärkerer Erytheme auf das Vorhandensein stärkerer UV-Intensitäten zu schließen. Man hat auf diese Weise eine erheblich verstärkte UV-Strahlung für die Nordsee angenommen. Wir sahen oben, daß die Meßbefunde gegen eine solche Annahme

sprechen und daß auch der Reflex von Sand und Wasser mit etwa 20% die Erwartungen nicht erfüllt. Zum Teil kommen die beobachteten starken Erytheme sicher daher, daß an der See die Möglichkeit besteht, von morgens bis abends in wenig bekleidetem Zustand im Freien zuzubringen. Bei gleicher Intensität kann so die Dosis erheblich steigen. Nach den neuesten an der Nordsee vorgenommenen Untersuchungen können allerdings schon nach unerwartet kurzen Sonnenbestrahlungen (15 min) Erytheme entstehen, deren Latenzzeit ebenfalls kurz ist. Dabei handelt es sich nicht um Wärmeerytheme, die durch fleckiges Aussehen und unscharfe Ränder mit Ausläufern gekennzeichnet sind.

Man muß damit rechnen, daß hierbei noch andere Faktoren eine Rolle spielen, wie eine momentane oder längerdauernde Empfindlichkeitssteigerung. Diese Steigerung kann sich entweder auf den für gewöhnlich wirksamen Spektralbereich beschränken oder es kann eine Sensibilisierung für langwelliges UV entstehen. Die Ursache könnte in einer direkten oder indirekten Beeinflussung des Hautstoffwechsels liegen, für die im ersten Fall der Reiz der Abkühlungsgröße, im letzteren die Umstimmung des vegetativen Tonus in Frage kommt.

Das Problem des Einflusses thermischer Bedingungen auf die Erythembildung ist noch keineswegs geklärt. Es liegen widersprechende Beobachtungen vor. Hyperämisierung der Haut soll erythemverstärkend wirken, Reize, die eine Entblutung der Haut bewirken, sollen die Erythembildung abschwächen. Doch liegen von der Seeküste gegenteilige Erfahrungen vor, wo dem Wind ein erythem- und pigmentfördernder Einfluß zugeschrieben wird. Die ganze Frage nach dem Einfluß der Hautbedingungen bedarf noch dringend einer Klärung.

f) Die Pigmentierung

Im Gefolge des UV-Erythems tritt während dessen Abklingen im allgemeinen am dritten Tag eine gleichmäßige Bräunung der Haut auf. Die Farbe dieses Pigmentes ist von der spektralen Zusammensetzung der wirksamen Strahlung abhängig. Gegenüber dem schönen rotbraunen Sonnenpigment ist das durch die künstliche Höhensonne hervorgerufene von graubraungelbem Ton. Die Pigmentierung klingt im Laufe von Wochen und Monaten langsam ab, soweit nicht eine Schälung der Haut erfolgt. Eigenartig sind plötzliche Pigmentrückgänge bei bestimmten Erkrankungen und nach Exzessen. Die Beziehungen zwischen hormonalen Vorgängen und Pigmentablagerungen anderer Art sind ja bekannt. Örtliche Pigmentierung tritt im übrigen auch nach langdauernden und häufigen Wärmeprozeduren und mechanischen Reizungen der Haut auf.

Das Hautpigment stammt wahrscheinlich aus verschiedenen Quellen. Ein Teil liegt bereits in den tieferen Schichten der Haut (der Basalzellenschicht), dem Auge von außen unsichtbar, vor. Dort wird es laufend durch ein Ferment, die Dopaoxydase, aus Dioxyphenylalanin gebildet. Im Verlauf des UV-Erythems tritt eine Wanderung des Pigments in die oberflächlichen Partien der Basalschicht

ein, wo es nun dem Auge sichtbar wird. Dieser Vorgang entspricht also dem Vorschieben eines bereits fertig gebildeten, tiefliegenden Filters an die Oberfläche heran. Die Neubildung dieses Melaninpigmentes wird offenbar ebenfalls durch Bestrahlung gefördert, vermutlich durch Wellenlängen über 300 mμ. Daneben tritt wahrscheinlich noch eine andere Art von Pigmentbildung auf, und zwar durch die Bestrahlung selbst durch Umwandlung von Eiweißkörpern wie Histidin, Tryptophan und Tyrosin. Gegenüber der fermentativen Pigmentbildung spricht man hier von der photochemischen Bildung.

Ob eine Pigmentierung ohne vorhergehendes Erythem möglich ist, ist eine strittige Frage. Wahrscheinlich liegen die Dinge so, daß eine beträchtliche Pigmentwanderung nur als Folge eines Erythems auftritt, während die photochemische Pigmentbildung davon unabhängig ist. Die Pigmentverstärkung nach Erwerb des natürlichen Erythemschutzes beruht vermutlich auf letzterem Prozeß.

Pigmentverstärkungen treten auch durch unspezifische, mechanische, thermische und chemische Reize auf. Die Entstehung der auffallend starken Pigmentierung im Seeklima ist wohl so zu erklären.

Über die physiologische Bedeutung des Hautpigmentes hat sich ein umfangreicher Streit der Forscher entwickelt. Ursprünglich wurde dem Pigment die Hauptaufgabe für den UV-Strahlenschutz zugewiesen. Die Tatsache eines bestehenden Erythemschutzes ohne Pigmentierung hat zu einer Revision geführt, zumal der Nachweis erbracht wurde, daß mit der Erythemresistenz im allgemeinen eine Verdickung der Hornschicht parallel geht und daß es Pigmente gibt, die nur einen beschränkten Erythemschutz gewähren (vielleicht das Fermentpigment). So wurde die Bedeutung des Pigmentes auf einem ganz anderen Gebiet gesucht, und zwar auf dem des Schutzes gegen Wärmestrahlen. Ohne Zweifel werden die langwelligen Strahlen von den Pigmenten verschiedener Herkunft stark absorbiert. Man glaubte somit, daß dem Pigment die Aufgabe zufiele, die Wärmestrahlung in der Region der Schweißdrüsen zu absorbieren, die auf diese Weise unverzüglich zur Beseitigung der eingestrahlten Wärmemengen in Aktion gesetzt würden, also durch äußeren Reiz, ohne erst den Umweg über die zentrale Regulation zu beanspruchen. Dem steht allerdings entgegen, daß das Pigment als Schutz gegen Wärmestrahlung nicht ganz zweckmäßig erscheint, da pigmentierte Haut eine gegenüber unpigmentierter Haut um 10 bis 15% geringere Reflexion hat und die Reflexion ohne Zweifel den müheloseſten Schutz darstellt. Man muß bei dieser Theorie auch die merkwürdige Annahme machen, daß das Pigment zwar durch Ultraviolettwirkung gebildet, aber zum Schutz gegen eine wesensandere Wirkungsgröße geschaffen sei. Neuerdings kehrt man wieder mehr zur ursprünglichen Auffassung des Erythemschutzes zurück, zumal nachgewiesen wurde, daß den Eiweißumwandlungsprodukten eine erhebliche Erythemschutzwirkung zukommt.

Eine andere Frage ist die, wieweit das Pigment heilsame Wirkungen ausübt.

Einige Heliotherapeuten glauben, einen Zusammenhang zwischen dem Grad der Pigmentierung und dem Fortschritt der Heilungsvorgänge beobachtet zu haben. Von anderer Seite werden solche Zusammenhänge abgelehnt. Man wird wohl nicht fehlgehen, wenn man folgende Annahme macht: Die Pigmentierung ist ein Symptom im Sinne einer Reaktionsprüfung. Die volle Fähigkeit Pigment zu bilden und regulär abzulagern, gibt einen Hinweis, daß gewisse physiologische Funktionen in Ordnung sind. Daß diese Kranken bessere Heilungsaussichten haben als solche mit Störungen des Hautstoffwechsels und der hormonalen Organe, ist einleuchtend. Man kann auch daran denken, daß Überdosierungen eine Störung der Pigmentation verursachen können und daß eine Überdosierung die Heilungsvorgänge erheblich beeinträchtigen kann. Gute Pigmentierung gibt also einen Hinweis auf die Pigmentierungsfähigkeit und auf eine zweckmäßige Behandlungsweise. Auf eine pharmakologische Wirksamkeit des Pigmentes kann aus solchen Beobachtungen nicht geschlossen werden. Ausgeschlossen ist es jedoch nicht, daß Hand in Hand mit der Pigmentbildung andere Eiweißumwandlungsprodukte entstehen, denen eine physiologische und therapeutische Wirkung zukommen könnte.

Im Zusammenhang damit ist die Frage von Bedeutung, ob bei der Heliotherapie Erythemschutz und Pigmentation erstrebenswerte Wirkungen oder kaum zu umgehende, aber unerwünschte Nebeneffekte darstellen. Diese Frage ist heute kaum zu beantworten, doch darf man darüber wohl sagen, daß Erythemschutz und Pigmentierung eine Akklimatisation bezüglich des Strahlungsklimas bedeuten mit der Folge, daß nun mit diesen Mitteln nur noch weniger intensive Reizwirkungen zu erzielen sind.

g) Die antirachitische Strahlungswirkung

Eine der eindruckvollsten Strahlenwirkungen ist die rachitisheilende Wirkung der ultravioletten Strahlung, die erst im Jahre 1919 von deutscher Seite entdeckt wurde und viel zur Förderung der Strahlentherapie in der ärztlichen Praxis wie auch zur Propagierung einer vernünftigen Freiluftanwendung beigetragen hat.

Für die Heilung ist allein ein Stoff verantwortlich zu machen, der aus einigen Sterinen (unverseifbare Fette, Lipoide) durch Ultraviolettwirkung entsteht: das Vitamin D_2. Die Ausgangssubstanz ist das Ergosterin, das durch Bestrahlung unter Durchlaufung einiger Zwischenstufen aktiviert wird. Das Absorptionsspektrum des reinen Vitamin D beginnt wenig über 300 mμ und hat sein Maximum bei ungefähr 265 mμ. Die Absorptionskurve des Ausgangsproduktes, des Ergosterins, beginnt bei 310 mμ und besitzt zwei Maxima bei 280 und 270 mμ und fällt dann nach der kurzwelligen Seite rasch ab. Das kurzwellige Ende des natürlichen Sonnenspektrums liegt also noch im Bereich der antirachitischen Wirksamkeit, wenn auch nur zu einem kleinen Teil und nur unter günstigen atmosphärischen Bedingungen.

Es ist hier darauf hinzuweisen, daß das Absorptionsspektrum des Ergosterins auch im Ultrarot noch einen Anstieg zeigt, der zwischen 2,5 und 4,5 μ liegt mit dem Maximum bei 3,8 μ. Bis jetzt konnte mit diesem Spektralgebiet allein keine Aktivierung erreicht werden und es ist noch unbekannt, ob nicht unter bestimmten Bedingungen aus bestimmten Ausgangssubstanzen mit diesem Strahlengebiet ein antirachitischer Stoff gewonnen werden kann. Nachgewiesen ist jedoch, daß die Ultraviolettaktivierung des Ergosterins durch zusätzliche Einstrahlung des ultraroten Bezirkes eine erhebliche Beschleunigung erfährt. Diese Tatsache hat noch nicht die nötige Beachtung gefunden und sie ist vielleicht geeignet, den Widerspruch zwischen dem theoretisch errechneten und dem praktisch notwendigen Ultraviolettbedürfnis im antirachitischen Gebiet wenigstens zum Teil zu klären.

Ergosterin kommt in einer großen Anzahl pflanzlicher und tierischer Lebensmittel vor, z. B. in Speck, Maisöl, Kokosöl, Baumwollöl, Milch, Spinat, jedoch nicht in Mineralölen. Besonderen Reichtum weisen gewisse tierische Gewebe auf, zum Beispiel die Leber und die Haut. Besonders die Dorschleber, aus der das altbewährte Heilmittel gegen die englische Krankheit, der Lebertran, hergestellt wird, ist reich an Ergosterinabkömmlingen. Das Vitamin D macht offenbar einen langen Umweg vom Oberflächenplankton des Meeres über kleinere und größere Lebewesen bis zur Dorschleber durch. — Vitamin D kann dem Organismus also auf verschiedene Art in genügender Weise zugeführt werden.

Eine naheliegende Frage erhebt sich dabei sofort: Welche ultravioletten Strahlungssummen sind notwendig, um Rachitis zu verhüten? Da man begreiflicherweise am Menschen in dieser Frage nicht experimentieren kann — man darf kein Kind absichtlich den Schädigungn des Vitaminmangels aussetzen und Selbstversuche erwachsener Forscher können hierbei keine Auskunft geben — wissen wir nichts Sicheres. Wir sind auch heute noch nicht in der Lage, die Menge des durch Bestrahlung in der Haut gebildeten und in den Organismus übergehenden Vitamins D festzustellen. So ist man auf die Ergebnisse von Tierversuchen angewiesen, für die sich die Ratte besonders geeignet zeigt, da sich bei ihr durch bestimmte Mangelernährung eine der Rachitis sehr ähnliche Störung erzeugen läßt.

So wurde festgestellt, daß im subtropischen Neuorleans (USA) während des Sommerhalbjahres eine tägliche Besonnung von zwei bis drei Minuten, im Winterhalbjahr von fünf bis sechs Minuten, entsprechend einer jeweiligen Strahlungssumme von 0,00134 Milligrammkalorien pro Quadratzentimeter von dem Strahlenbereich unter 313 mμ zur Rachitisverhütung genügt. In gemäßigten Breiten im Staat Neuyork mußte die Winterdosis das Neunfache der Sommerdosis betragen. Ferner wurde festgestellt, daß die Bestrahlung des 80sten Teils der Körperoberfläche der Ratte genügte.

Diese Strahlensummen mögen nicht hoch erscheinen. In Wirklichkeit muß beim Menschen noch wesentlich weniger erforderlich sein, denn erfahrungsgemäß erhält der Durchschnittssäugling in seinem Kinderwagen bis zum Hals eingepackt

sehr wenig Strahlung, zumal in der Stadt. Die Rattendosen sind aus zwei Gründen nicht ohne weiteres auf den Menschen zu übertragen, einmal weil das Fell gänzlich andere Bedingungen schafft und zweitens, weil es sich bei den Ratten stets um den Extremfall ungünstigster Ernährung handelt — denn anderenfalls werden die Ratten eben nicht rachitisch. Die therapeutische Behandlung hat immer nur das Ernährungsdefizit auszugleichen, und bei vernünftiger Ernährung (auch der stillenden Mütter) ist dieses Defizit offenbar recht klein.

Jenseits des Polarkreises macht die Natur das Großexperiment des Polarwinters. Nach den neuesten Untersuchungen an Lappenkindern ist dort fast keine Rachitis anzutreffen — offenbar allein auf Grund der Ernährung, bei der eine für den Wintervorrat gesammelte Beerenart eine besondere Rolle spielen soll.

Wenn schon ein Defizit auszugleichen ist, und die natürliche Bestrahlung Schwierigkeiten bereitet, so ist aus mancherlei Gründen der Bestrahlung mit der künstlichen Höhensonne vor der Einnahme von Vitaminpräparaten der Vorzug zu geben. Der Dosierungsspielraum ist bei ersterer breiter, und giftige Nebenprodukte treten dabei offenbar nicht in Erscheinung.

Die Wirkungsart der Behandlung ist folgende: Im Hauttalg und in den oberflächlichen Schichten der Epidermis wird das zumeist in Gesellschaft des Cholesterins auftretende Ergosterin aktiviert, das von da aus in den Kreislauf gelangt. Die primäre Wirkung besteht in einer Mobilisierung von anorganischem Phosphor und in einer Einschränkung der Ausscheidung dieses Stoffes. Dadurch kann der Blutkalk vermehrt werden und damit ist die Möglichkeit zur normalen Verknöcherung der Knorpel gegeben. Zugleich bedeutet das eine Basenanreicherung und damit eine Behebung der Azidose. Freilich kann die Kalkbindung so plötzlich einsetzen, daß tetanische Erscheinungen auftreten, wie es im Frühjahr zur Zeit der ersten Sonnentage nicht selten ist.

Wie weit beim Erwachsenen die Vitamin-D-Bildung im Rahmen des Stoffwechsels, des Mineralhaushaltes und des Säure-Basengleichgewichtes eine Rolle spielt und wie weit hier Mangelerscheinungen ausgelöst werden können, ist noch nicht genügend geklärt.

h) Weitere Ultraviolettwirkungen

Es ist nicht die Aufgabe dieses Teils, ausführliche Mitteilungen über die Physiologie und Pathologie der Strahlenwirkungen zu machen. Die direkten Ultraviolettwirkungen etwas eingehender zu schildern schien notwendig, um die bioklimatischen Strahlungsprobleme dem Verständnis näherzubringen. Die weiteren indirekten Wirkungen auf den Organismus sind vorwiegend unter Verwendung von künstlichen Lichtquellen untersucht worden und es ist fraglich, wie weit sie auf die Verhältnisse bei natürlicher Bestrahlung übertragen werden können. Der Erforschung der indirekten Wirkungen natürlicher Strahlung stehen große Schwierigkeiten entgegen, die besonders in dem Umstand liegen, daß immer eine Anzahl

anderer, sagen wir einmal unspezifischer Faktoren zu gleicher Zeit mitwirkt, deren Abtrennung oder Abschätzung nicht leicht ist, solange sie noch so wenig erforscht sind wie es heute der Fall ist. Ferner haben wir es im Freien meistens mit sehr wechselnden Verhältnissen zu tun.

Selbst bei der Bestrahlung mittels künstlicher Lichtquellen im Zimmer müssen wir notgedrungen immer ein Luftbad mit verabfolgen. Manche als Ultraviolettwirkungen bezeichnete Erscheinungen können durch das Luftbad bedingt sein.

Aus diesen Gründen soll nur noch ein kurzer Überblick über die als indirekte Ultraviolettwirkungen bezeichneten Vorgänge gegeben werden.

Stoffwechsel: Während des Erythems ist der Gasstoffwechsel erhöht, einmal wegen der gesteigerten Wärmeabgabe erythematöser Partien, die nur zum kleineren Teil durch Einschränkung der Hautperspiration ausgeglichen wird, vor allem aber durch die Wirkung von Zellzerfallsprodukten. Bei fieberhafter Reaktion ist die Erhöhung des Gasstoffwechsels darum bedeutend größer. Im Verlauf chronischer Bestrahlungen wurde ein Absinken der Verbrennungsvorgänge um 10% beobachtet, doch ist nicht genügend sichergestellt, wieweit eine Gewöhnung an die Vorgänge der Bestrahlung und der Gasstoffwechseluntersuchungen den Ausschlag geben oder ob die Wirkung nicht auf einer Änderung der Reaktion gegenüber dem Luftbad beruht. Sehr unwahrscheinlich ist auch die behauptete sofortige Stoffwechselsteigerung während der UV-Bestrahlung. Wenn diese an der Nordsee, aber nicht in Hamburg gefunden wurde, so liegt das nicht an Unterschieden der UV-Intensität, sondern an solchen der Abkühlungsgröße, deren stoffwechselsteigernde Wirkung bekannt ist. Der respiratorische Quotient (das Verhältnis von abgegebener Kohlensäure zum aufgenommenen Sauerstoff) soll im Verlauf einer wochenlangen Bestrahlungsserie erheblich ansteigen und zwar auf fast 1,0. Auch die häufig nach anstrengender Arbeit beobachtete Herabsetzung des respiratorischen Quotienten soll nach Bestrahlungen ausbleiben. Der ganze Arbeitsstoffwechsel soll dahin eine Änderung erfahren, daß der Kalorienverbrauch sinkt und eine bis 60% betragende Leistungssteigerung einsetzt. Deshalb ist die Frage entstanden, ob UV-Bestrahlungen vor Sportwettkämpfen zu den unerlaubten „Doping"-Mitteln gehören. Da es sich um keine „Aufreizung" mit nachfolgender Schädigung handelt, ist die Frage verneint worden.

Der Eiweißstoffwechsel ist gesteigert, was sich an der erhöhten Ausscheidung von Stickstoff, Schwefel und Phosphor zeigt. Der Reststickstoff ist in der Regel vermindert.

Im Lipoidstoffwechsel zeigt sich eine Cholesterinvermehrung im Blut.

Der Kohlehydratstoffwechsel zeigt eine Tendenz zu erhöhter Glykogenspeicherung. Während der normale Blutzucker nicht verändert wird, sinkt der krankhaft erhöhte Blutzucker, wobei offenbar auch der ultrarote Bezirk mitwirkt.

Der Mineralstoffwechsel zeigt nach einer initialen Azidose eine alkalotische Einstellung, die wie oben erwähnt, zu tetanischen Anfällen führen kann, wenn

es dabei zu plötzlicher Kalziumbindung kommt, wie bei der Rachitisheilung. Ein niedriger Blutkalkspiegel wird erhöht, das Verhältnis Kalzium : Kalium wird ebenfalls geregelt, was für gewisse vegetative Störungen von Bedeutung ist.

Bei Störungen des Purinstoffwechsels ist eine Steigerung der Harnsäureausscheidung beobachtet worden, so daß eine klimatische Behandlung der Gicht aussichtsreich erscheint.

Die Atmung wird langsamer und tiefer, was auf eine Erregbarkeitssteigerung des Atemzentrums zurückgeführt wird. Die alveoläre Kohlensäurespannung wird erhöht, wie es im alkalotischen Stadium erklärlich ist.

Kreislauf: Durch die in der Haut entstehenden histaminähnlichen Substanzen entsteht eine Blutdrucksenkung, die durch Wärmeeinstrahlung verstärkt wird. Das Blutserum soll seine vasokonstriktorischen Eigenschaften verlieren. Eine 10%ige Steigerung des Minutenvolumens wird ebenfalls mit den H-Substanzen in Verbindung gebracht. Damit sind wohl die günstigen Erfahrungen bei Hypertonie und Angina pectoris zu erklären.

Blut: Erythrozyten und Hämoglobin erfahren, soweit herabgesetzte Werte bestehen, eine Steigerung. Im Verlauf des Erythems findet eine Leukozytenvermehrung statt. Die Thrombozytenzahl steigt ebenfalls und damit die Gerinnungsfähigkeit des Blutes. Eine vermehrte Bildung von Abwehrstoffen gegenüber Infektionserregern ist ebenfalls beschrieben worden.

Drüsen mit innerer Sekretion. Der Schilddrüse wird ein ganz hervorragender Einfluß bei der Auslösung der Strahlenwirkung zugeschrieben. Im Dunkeln gehaltene Tiere zeigen eine kolloidarme Schilddrüse. Durch Bestrahlung, aber auch durch die Einspritzung eines von bestrahlten Tieren gewonnenen Hautextraktes wird der Kolloidgehalt gesteigert. Die Durchblutung der Schilddrüse nimmt durch UV-Strahlung zu. Deshalb ist bei Überfunktion (Basedow, Thyreotoxikose) Vorsicht geboten. Die Nebenschilddrüse zeigt im Gegenteil bei Lichtmangel Hyperplasie, vermutlich im Zusammenhang mit Störungen des Kalkstoffwechsels.

Verdauungsorgane: Die Säureabscheidung des Magens wie auch die mechanische Tätigkeit desselben nimmt zu, wahrscheinlich durch die Wirkung histaminähnlicher Substanzen. Die Folge davon ist eine Steigerung des Appetits und eine Verbesserung der Magenverdauung, was bei vielen Krankheitszuständen segensreich wirkt. Andrerseits können bei Überdosierungen krankhafte Steigerungen dieser Funktionen auftreten im Verein mit gastritischen Erscheinungen. Starke Wärmewirkung bei Sonnenbestrahlungen kann ebenfalls — wahrscheinlich auf dem entgegengesetzten Weg — zu Verdauungsbeschwerden führen. Die Abneigung gegen Fleisch und Fett an heißen Sommertagen ist ja bekannt.

Nierentätigkeit: Während des Erythems ist eine Steigerung der Nierenabsonderung zu beobachten, für die wohl die Stoffwechselsteigerung und die Stei-

gerung der Hautperspiration der erythematösen Partien verantwortlich zu machen sind. Vielleicht entstehen auch durch das mit der vermehrten Wärmeabgabe auftretende Frösteln sekretorische Reize für die Nierentätigkeit.

11. Wirkungen der sichtbaren Strahlung

Abgesehen von den Wärmewirkungen, die bereits besprochen wurden, wirkt die sichtbare Strahlung besonders über das Auge auf den Organismus ein. Sie übt einen erregenden Einfluß aus, sowohl rein psychisch als auch durch Steigerung der seelisch bedingten Bewegungsantriebe. Dabei wirkt nicht nur die Helligkeit als solche auslösend, sondern auch landschaftliche Reize und andere Eindrücke des Auges. Aber auch mehr oder weniger unabhängig von psychischen Eindrücken ist, wie Untersuchungen wahrscheinlich gemacht haben, durch hormonale Beziehungen (das Melanophorenhormon), die Verbindung zwischen Auge, Hypophyse und Stoffwechselgeschehen hergestellt. Eine Reihe von tageszeitlichen Rhythmen wird so einer Erklärung zugeführt.

Wir haben im Vorstehenden chemische Wirkungen der kurzwelligen Ultraviolettstrahlen kennengelernt. Die meisten dieser Wirkungen werden von dem Spektralgebiet unter 313 mμ ausgelöst. Damit ist nicht gesagt, daß den längerwelligen Bezirken etwa keine chemischen Wirkungen zukommen sollen. Nur sind unsere Kenntnisse hierüber noch ungenügender. Allerdings steht fest, daß desto eher mit chemischen Strahlenwirkungen zu rechnen ist, je kurzwelliger die Strahlen sind. Wahrscheinlich können wir im Bereich des langwelligen UV zwischen 320 und 400 mμ und im Gebiet der blauvioletten Strahlung noch manche Entdeckungen machen. So hat sich z. B. ergeben, daß das Warburgsche Atmungsferment, dessen Absorptionsspektrum ein Maximum bei 435 mμ zeigt, durch blauviolette Strahlung besonders angeregt wird, und es sind auch tatsächlich Wirkungen dieses Spektralbezirkes auf die Zellatmung festgestellt worden.

Neben einer oxydationssteigernden Wirkung wird dem Blauviolettlicht eine sympathikotonisierende Wirkung zugeschrieben, wie auch ein Einfluß auf gewisse Hormone, indem die Adrenalinwirksamkeit herabgesetzt, Insulin dagegen aktiviert wird. Die Brunsthormonwirkung wird gehemmt. Psychisch wird eine beruhigende Wirkung beobachtet.

Dem Rotlicht wird ebenfalls eine Reihe von Wirkungen, insbesondere auf die weiblichen Sexualhormone zugeschrieben, Wirkungen die zum Teil auch im Reagenzglas beobachtet worden sind. Gegenüber Adrenalin und Insulin scheint die Wirkung derjenigen des Blaulichtes entgegengesetzt zu sein und dasselbe gilt für den vegetativen Tonus. Einige Fermentwirkungen wie z. B. die Blutglykolyse fand man durch Rotlicht gesteigert. Im allgemeinen soll die Reduktionskraft der Gewebe vermehrt sein. Interessant sind die therapeutischen Erfahrungen mit Rotlichtbestrahlungen bei den weiblichen Regelstörungen. Wieweit dabei psychische

Einflüsse maßgebend sind, ist schwer abzuschätzen. Das ganze Gebiet ist noch wenig geklärt, nicht zuletzt, weil verschiedene Autoren Rotlicht mit ganz unterschiedlichen Spektralverteilungen angewandt haben, Neonlicht, verschiedenes Rotfilterlicht, „warmes und kaltes“ Rotlicht usw. Man wird gut daran tun, zunächst mit einiger Skepsis an dieses Gebiet heranzugehen. Therapeutischen Erfolgen – so wichtig sie auch in praxi sind – kommt nur eine beschränkte Beweiskraft zu, denn wir kennen ja die großen Erfolge berühmter Scharlatane.

12. Die Heliotherapie

a) Bedingungen für die Heliotherapie

Wir haben gesehen, daß die Helioprophylaxe, die Gesunderhaltung durch Sonnenwirkung, offenbar in jedem Klima möglich ist, sofern nicht eine unvernünftige Lebensweise und besonders eine fehlerhafte Ernährung ein allzu großes „Defizit“ schafft. Zur Heliotherapie, der Anwendung der Sonnenstrahlung als Behandlungsmittel bei bestimmten Erkrankungen, sind etwas günstigere Strahlungsbedingungen notwendig. Und das um so mehr, wenn die Heliotherapie ganzjährig ohne Unterbrechungen durch ungünstige Jahreszeiteneinflüsse durchgeführt werden soll. Nördlich des Polarkreises fällt ein halbes Jahr für die Sonnenbehandlung aus, und im Tiefland der gemäßigten Breiten sind die Wintermonate von November bis Februar für die Heliotherapie nicht günstig. Selbst im Hochgebirge fallen die Zeiten der großen Schneefälle im November und Dezember aus und auch die Schneeschmelze bedingt eine Beeinträchtigung der therapeutischen Möglichkeiten. Die gleichmäßigsten Bedingungen sind in der Wüste gegeben. Die Gleichmäßigkeit des ägyptischen Strahlungsklimas bietet vorzügliche Möglichkeiten für die Heliotherapie.

Doch ist dabei zweierlei zu bedenken. Erstens ist es fraglich, ob die Gleichmäßigkeit unbedingt notwendig oder wünschenswert ist. Jede Gleichmäßigkeit des Klimas ermöglicht eine maximale Akklimatisation und die Folge davon ist eine fortschreitende Abschwächung des klimatischen Reizes. Das trifft auch für die Strahlenwirkungen zu, obgleich wir noch nicht genau darüber unterrichtet sind, wieweit der Organismus mit dem Erwerb des Erythemschutzes auch anderen Strahlenwirkungen gegenüber nicht mehr anspricht. Das zeitweise Auftreten von Schlechtwetterperioden enthebt den Therapeuten der Aufgabe, in gewissen Abständen eine „Sonnenentziehung“ durchzuführen, um die Reizfähigkeit des Organismus wieder herzustellen. Für manche Übertreiber ist es gut, daß wenigstens nachts keine Sonne scheint. Das biologische Geschehen läuft in Rhythmen ab, bei denen sich solche mit kleiner und großer Wellenlänge überlagern und es ist wahrscheinlich, daß eine gute Rhythmisierung, die der Reaktionsbereitschaft des Organismus angepaßt ist, die Erfolge bei Klimakuren zu steigern vermag.

Zweitens gelten ähnliche Überlegungen für die Frage der Strahlungsintensitäten. Es ist sehr fraglich, ob eine Steigerung der Intensität über ein gewisses Maß besondere Vorteile bietet. Der Organismus hat — wie wir sahen — die Fähigkeit, sich durch Schutzmaßnahmen den Intensitäten anzupassen. Er nimmt sich also von der gebotenen Intensität nach Eigengesetzen ein gewisses Maß, soweit es sich um chronische Einwirkung handelt. So ist es durchaus möglich, daß bei geringeren Intensitäten dieselbe Reizgröße zustande kommt, wie bei der Einwirkung maximaler Intensitäten.

Diese Probleme sind von großer Bedeutung für die Praxis der Heliotherapie und für die Beurteilung der Eignung verschiedener Klimate. Die Heliotherapie kann niemals für sich allein betrieben werden. Stets ist damit eine Freiluftkur verbunden, für welche die Gesamtheit der klimatischen Faktoren wirksam wird. Einflüsse der Lufttemperatur und der Luftbewegung vereinigen sich mit der langwelligen Abstrahlung und der Wärmeeinstrahlung zur Abkühlungsgröße. Darüber hinaus übt der Gehalt der Luft an gewissen Beimengungen wie z. B. Jod, Bromide, Kochsalz, Radiumemanation u. a. Einflüsse aus, die den Charakter der Heliotherapie durch Änderung der Reaktionen des Organismus in ganz bestimmter Weise abändern können. Damit ist es uns verständlich, daß bei manchen Patienten, die im Hochgebirge nicht recht vorwärts kommen, die Verschickung an die Seeküste günstig wirkt und umgekehrt. Soweit die sozialen Verhältnisse es erlauben, ist ein Wechsel zwischen Hochgebirge und See sehr zu empfehlen, besonders bei reaktionsschwachen, „klimarefraktären" Kranken.

Die Abkühlungsgröße ist nach verschiedenen Richtungen hin für die Heliotherapie von großer Bedeutung. Wie wir sahen, ist der Betrag der Wärmeeinstrahlung von der Sonne auf den Organismus recht beträchtlich. Die Abkühlungsgröße entscheidet darüber, wie stark der Organismus dadurch belastet wird. Die infolge einer Überwärmung entstehende Neigung zur Blutdrucksenkung, zur Blutleere innerer Organe und zu Verdauungsstörungen, ferner die Überbeanspruchung des Kreislaufes betrachten wir heute als unerwünschte Nebenwirkung der Heliotherapie. Direkte Besonnung ist also nur durchzuführen, wenn eine genügend hohe Abkühlungsgröße für ausreichende Entwärmung sorgt. Liegebalkone, zumal in windgeschützten Hochgebirgstälern haben im Sommer oft ein bedenkliches Überwärmungsklima. Selbst an der Seeküste mit ihrer hohen Abkühlungsgröße muß im Sommer gelegentlich um die Mittagszeit die Besonnung der Kranken eingestellt werden, also gerade zur Zeit des Strahlungsmaximums. Für dieses Problem sind technische Einrichtungen für die Heilstätten sehr wichtig, welche die Ausnützung von Luftströmungen — die allerdings vorhanden sein müssen — ermöglichen.

Dem Reiz der Abkühlungsgröße sind eingreifende therapeutische Wirkungen zuzuschreiben. Durch den Hautreiz und durch die Anspannung der Wärmeregulation im Sinne einer Einschränkung der Wärmeabgabe und einer Steige-

rung der Wärmeproduktion entstehen therapeutisch wichtige Anregungen für den Stoffwechsel und das vegetative Nervensystem unter gleichzeitiger Anregung der Atmung und Schonung des Kreislaufs. Die inneren Organe sind gut durchblutet. In vielem sind die Wirkungen der Abkühlungsgröße den Strahlungswirkungen im kurzwelligen Gebiet ähnlich, und in manchem ergänzen und ersetzen sie diese aufs beste. Ähnlich verhält es sich mit der Reizwirkung der Luftdruckerniedrigung im Hochgebirge. Man muß für die Therapie diese Reizwirkungen als Einheit betrachten, bei der bald die Strahlenwirkung, bald die Abkühlungsgröße im Vordergrund steht. Die Dosierung hat besonders diese beiden Reizgrößen zu berücksichtigen.

Wir können somit sagen, daß Heliotherapie überall dort getrieben werden kann, wo gewisse Strahlungsbedingungen gegeben sind, an die aber keineswegs maximale Anforderungen gestellt werden. Die Tieflandsonne reicht während zwei Drittel des Jahres zu heliotherapeutischen Zwecken aus. Aber es müssen gewisse andere klimatische Bedingungen erfüllt sein, die einerseits die Durchführung der Besonnung ermöglichen, andererseits die Sonnenwirkungen in zweckmäßiger Weise ergänzen. So verstehen wir die vorzüglichen Erfahrungen bei der Behandlung der Tuberkulose der Knochen und Gelenke, wie sie an der Nordseeküste gewonnen wurden und die nur leider zu wenig im Kreise der Ärzte und der Kranken bekannt sind. Gerade Rollier, der bekannte Vertreter der Hochgebirgsheliotherapie, schätzt den Wert des reinen Luftbades sehr hoch ein und bejaht die Angaben des Polarforschers Nansen, nach denen die Eskimos, die infolge der grönländischen Bestrahlungsverhältnisse und der dicken Pelzbekleidung nur sehr geringe Strahlenmengen aufnehmen, ihre Gesundheit den im Zelt eingenommenen Luftbädern verdanken.

b) Die Methodik der Heliotherapie

Nach den Ausführungen über die Verhältnisse der Sonnen- und Himmelsstrahlung in verschiedenen Spektralbereichen haben wir die Möglichkeit, zu Dosierungszwecken ganz verschiedene Strahlungsklimate für den Kranken zu schaffen. Die wichtigsten Mittel zur Variierung sind Wahl der Tageszeit, verschiedenartige Abschattung von Himmel und Sonne und Expositionsrichtung gegenüber dem Einfall der Sonnenstrahlung. Damit kann die mittlere spektrale Zusammensetzung und die in der Zeiteinheit auf die mittlere Oberflächeneinheit wirkende Intensität verändert werden. Für gewisse typische Expositionslagen kann die Intensität im erythemwirksamen Gebiet und die der Gesamtstrahlung leicht gemessen werden. Die Dosen ergeben sich dann durch Multiplikation mit der Bestrahlungsdauer.

Eine Heilstätte soll über verschiedene, sich in typischer Weise unterscheidende Expositionsplätze verfügen. An einem Platz soll möglichst viel vom Himmelsgewölbe sichtbar sein (freie Terrasse), an einem zweiten soll die Möglichkeit der Abschattung der direkten Sonnenstrahlung gegeben sein bei möglichst freiem Himmel, an einem

dritten Ort eine ausgiebige Abschattung des Himmels bei freiem Zutritt der direkten Sonnenstrahlung (Liegebalkone, Loggien). Gegenüber dem natürlichen Verhältnis zwischen kurzwelliger und langwelliger Strahlung bei der freien Exposition des ersten Falles, haben wir es im zweiten mit einem Überwiegen der kurzwelligen Strahlung (bei einer Intensitätseinbuße von 25 bis 50% in diesem Bereich), im letzten Falle mit einem Überwiegen der Wärmeeinstrahlung zu tun (bei ungefähr 40 bis 60% Einbuße im kurzwelligen Bereich).

Die Exposition erfolgt stets in unbekleidetem Zustand, höchstens findet ein streifenförmiges Sonnenhöschen zur Bedeckung der Genitalien Anwendung. Außerhalb des eigentlichen Sonnen-Luftbades wird die Körperbedeckung den Abkühlungsverhältnissen angepaßt. Die Ausdehnung der Freiluftkur auf die Nacht halten wir nicht für angebracht, da der rhythmische Ablauf der biologischen Vorgänge eine Zeit der Abhaltung jeglicher physikalischer Reize erfordert. Für gute nächtliche Lüftung der Krankenzimmer muß selbstverständlich gesorgt sein.

Die Dosierung zerfällt in zwei getrennte Teile. Die Wirkung der Wärmestrahlen geht in den Komplex der Abkühlungsgröße ein und wird mit dem Frigorigraphen erfaßt. Von diesen thermischen Bedingungen ist es in weitem Maße abhängig, welcher Gebrauch von der kurzwelligen Strahlung gemacht werden kann. Bei zu heißen Bedingungen muß die Expositionszeit — unabhängig von der erwünschten Ultraviolettdosis — ebenso verringert werden, wie bei zu kühlen Bedingungen, wenn Schädigungen vermieden werden sollen. Die tatsächliche Expositionszeit richtet sich stets nach der kleineren, der aus Dosen und Intensitäten errechneten Zeit. Zu Beginn der Behandlung könnte z. B. unter behaglich thermischen Bedingungen im Hinblick auf die Abkühlungsgröße sehr lang exponiert werden, im Hinblick auf die Erythemempfindlichkeit jedoch nur kurz. In diesem Fall richtet sich die Expositionszeit nur nach der Ultraviolettdosis. Nach Erwerb des Erythemschutzes ist meistens die Abkühlungsdosis maßgebend.

Die Dosierung geht nun folgendermaßen vor sich[1]: Zu Beginn der Kur wird der Kranke einige Tage fast ganz im Zimmer gehalten. Sodann wird er im Bett unter Vermeidung direkter Sonnenstrahlung und stärkerer Luftbewegung ins Freie gebracht, wobei die Bedeckung den thermischen Bedingungen angepaßt wird. Nach ungefähr einer Woche ist die erste Anpassung (Primärakklimatisation) im wesentlichen erreicht und die Sonnen-Luftbäder können beginnen. Es wird sogleich der ganze Körper exponiert, jedoch zunächst nur für kurze Zeit. Der Arzt setzt unter Berücksichtigung der Konstitution, der Reaktionsfähigkeit und der Schwere des Krankheitsbildes die Anfangsdosis für Abkühlung und diejenige für Ultraviolett getrennt fest sowie die Dosissteigerung als vorläufigen Kurplan. Je

[1] Ich beziehe mich dabei auf den an der Berliner Kinderheilstätte „Schöneberg" in Wyk auf Föhr an der Nordsee üblichen Kurmodus, der nach meinen Erfahrungen den therapeutischen Notwendigkeiten am besten Rechnung trägt. Das Verfahren wurde auf Grund umfassender physiologischer Untersuchungen ausgearbeitet.

nach dem Grad der Reaktion kann dann im weiteren Verlauf die Steigerung der Dosen verstärkt oder abgeschwächt werden.

Dieses Dosierungsverfahren erscheint auf den ersten Blick schematisch. Es enthält zunächst jedoch all das, was ein guter Arzt bestenfalls richtig abschätzen kann. Das ärztliche „Fingerspitzengefühl" setzt bei der Festlegung der Dosis und deren Steigerung, bei der Erkennung und Bewertung der Reaktionen des Organismus und bei der Einschätzung gewisser, heute noch auf exakte Weise nicht erfaßbarer Witterungsbedingungen ein.

Andernorts finden häufig noch die älteren Dosierungsschemata Verwendung, nach Bernhard oder nach Rollier.

Die Gießener Methode zur Lupusbehandlung beginnt mit einmal täglich 3 bis 5 Minuten und schreitet bis zu zweimal täglich 10 bis 30 Minuten fort. Dabei wird sorgfältig eine Überwärmung des Körpers vermieden.

Als Maßstab für die Reaktion des Körpers dient das Allgemeinbefinden, ferner die Körpertemperatur sofort, eine Stunde nach dem Sonnenbad und am Abend. Pulsfrequenz, Herzklopfen, Kopfschmerzen, Schlafstörungen, Appetitlosigkeit geben weitere Hinweise auf eventuelle Überdosierung.

c) Hauptanzeigen für die Heliotherapie

Die chirurgische Tuberkulose, die tuberkulöse Erkrankung der Knochen, Gelenke, Drüsen, des Brust- und Bauchfells, der Haut und der Genitalorgane u. a. ist die eigentliche Domäne der Heliotherapie. Bei diesen Erkrankungen werden glänzende Erfolge erzielt wie sonst durch keine Therapie. Die Behandlungsdauer beträgt allerdings oft Jahre, aber das Endergebnis ist dann die Wiedererlangung der Arbeitsfähigkeit. Die lange Liegezeit wird zweckmäßig mit zielbewußter Beschäftigung ausgefüllt, bei Kindern mit Schulunterricht und Basteln, bei Erwachsenen mit Handwerksarbeit. Leider wird von der klimatischen Therapie allzu oft erst in einem späten Stadium Gebrauch gemacht, in dem die Heilungszeit verlängert und die Heilungsaussichten vermindert sind. Doch hat gerade bei alten, als aussichtslos angesehenen Fällen die Klimatherapie ihre schönsten Triumphe gefeiert.

Auch bei anderen Erkrankungen des Skelettsystems werden gute Erfolge erzielt, bei Knochen- und Gelenkverbildungen, bei Knochenmarkentzündungen nichttuberkulöser Art, ferner bei Knochenbrüchigkeit u. a.

Bei der Lungentuberkulose ist man von der direkten Besonnung wieder abgekommen, weil häufig infolge überstarker Reaktionen Verschlimmerungen beobachtet wurden. Da das Schattenlicht (die ultraviolette Himmelsstrahlung) dabei wesentlich ungefährlicher zu sein scheint, liegt die Vermutung nahe, daß die bei direkter Sonnenbestrahlung auftretenden Wärmewirkungen als ungünstig zu betrachten sind. Vielleicht kann in Zukunft bei deren Vermeidung die Heliotherapie der Lungentuberkulose doch wieder mit Nutzen aufgenommen werden.

Auf weitere Heilanzeigen wurde bei der Besprechung der Strahlenwirkungen auf den Organismus hingewiesen.

13. „Mystische" Strahlen

Die Physik hat in den letzten Jahrzehnten auf dem Gebiet der Strahlen große Eroberungen gemacht, die für Biologie und Medizin erhebliche Bedeutung erlangt haben. Die Lücke zwischen den Rundfunkwellen und den Ultrarotstrahlen ist weitgehend geschlossen, nachdem die Herstellung von Millimeterwellen gelungen ist. Die Kurzwellen und Ultrakurzwellen haben bedeutende biologische Wirkungen. Kann man doch mit ihrer Hilfe beträchtliche, ja lebensgefährliche Temperatursteigerungen im Inneren bestrahlter Gewebe erzeugen. Offenbar werden gewisse Eitererreger durch diese Strahlen im lebenden Gewebe besonders geschädigt. Ferner ist es gelungen, Strahlen herzustellen, die vorwiegend das in der Sonnenstrahlung nicht mehr vorhandene kurzwellige Ultraviolett enthalten, das eine starke chemische und bakterienfeindliche Wirksamkeit entfaltet. Man ist noch weiter in das kurzwellige Gebiet vorgedrungen und macht von den zellschädigenden Wirkungen der Grenz- und Röntgenstrahlen in der Medizin praktischen Gebrauch. Man konnte Beobachtungen über die Wirkung der γ-Strahlen des Radiums machen. Und man hat selbst die Höhenstrahlung, die durchdringendste der uns bekannten Strahlungen, eingehenden Messungen unterzogen. Man hat sogar die Vermutung ausgesprochen, daß die Höhenstrahlung für das Altern der Organismen verantwortlich zu machen sei. (Siehe S. 212.) Die Existenz der Höhenstrahlung unterliegt gewiß keinem Zweifel, aber die ihr zugeschriebenen Wirkungen auf den Organismus sind noch sehr mangelhaft bewiesen.

Ähnlich steht es mit anderen Strahlungen. Die Sonnenflecke sind wohlbekannte Erscheinungen, ihr Einfluß auf die erdmagnetischen Verhältnisse ist nachgewiesen, und es ist nicht von der Hand zu weisen, daß gewisse Witterungserscheinungen damit in Zusammenhang stehen. Eine Periodizität der Sonnenfleckenerscheinungen ist durch die Umdrehungszeit der Sonne gegeben. Andererseits zeigen viele Lebenserscheinungen auf der Erde periodische Schwankungen und es liegt nahe, solche Periodizitäten miteinander in Zusammenhang zu bringen. Aber hier setzt die große Schwierigkeit ein, daß sich Dutzende von Rhythmen überlagern, und es erscheint fast ausgeschlossen, hier mit den üblichen statistischen Mitteln ursächliche Zusammenhänge nachzuweisen, wie z. B. die Abhängigkeit der Sterblichkeit in den Großstädten von den Sonnenflecken. Es mutet auch recht merkwürdig an, in einem großen wissenschaftlichen Werk, das vor kurzem in Frankreich erschienen ist, Schlüsse über die Abhängigkeit der Judeneinwanderung in Nordamerika und des Wechsels zwischen konservativen und liberalen Ministerien in England von den Sonnenflecken zu finden!

Auch die Existenz der Gurwitschstrahlung ist sehr wahrscheinlich gemacht

worden (s. Kapitel „Organismenstrahlung"). Aber daß diese Strahlung eine spezifisch zellteilungsfördernde Wirkung hat und den Namen „Mitogenetische Strahlung" mit Recht führt, darüber konnten noch keine widerspruchslosen Beweise geführt werden, und somit sind auch die Spekulationen über Krebsentstehung u. a. noch mit Reserve aufzunehmen.

Soweit liegt wenigstens die physikalische Seite der Energieemissionen klar. In den letzten Jahren sind auf dem Gebiet der Korpuskularstrahlung mit exakten Mitteln sogar ganz neue Erscheinungen entdeckt worden, von deren Möglichkeit man früher keine Ahnung hatte (Positronen, Neutronen). (Siehe Kapitel 1.)

Aber es wird auch die Existenz einer Reihe von Strahlungen behauptet, deren Nachweis nicht mit exakten Mitteln geführt wird, sondern mit Hilfe der Wünschelrute und unter Heranziehung von Medien (d. h. Personen, die über ganz besondere „übersinnliche" Fähigkeiten verfügen). Hier betreten wir das Gebiet der mystischen Strahlen.

Es kann nicht von vornherein abgelehnt werden, daß für die eine oder andere Erscheinung noch einmal exakte Unterlagen beigebracht werden können. Aber man darf mit allem Nachdruck einige Forderungen und Richtlinien für solche Fälle aufstellen, um saubere Verhältnisse zu schaffen und unnötige Beunruhigungen des Publikums zu vermeiden.

Eine dieser Forderungen ist die, daß Naturerscheinungen, die nicht mit objektiven Mitteln nachgewiesen sind, auf die vielmehr auf übersinnlichem Wege geschlossen wird, solange die Realität abgesprochen wird, bis ein exakter Nachweis erfolgt ist. Veröffentlichungen über diese Fragen in der Tagespresse unter naturwissenschaftlichen Kennzeichen müssen unschädlich gemacht werden. Ich bin mir wohl bewußt, daß diese Fragen äußerst heikel sind und daß Menschen mit genialem Blick der exakten Forschung vorauseilen können und mit naturwissenschaftlichen Mitteln kaum von paranoiden Sonderlingen zu unterscheiden sind. Aber man darf im Interesse der Allgemeinheit verlangen, daß in solchen Fällen erst mit der nötigen Gründlichkeit Stein auf Stein geschichtet wird, bevor in breiteren Volksschichten Unruhe erregt wird. Es ist sehr begrüßenswert, daß das Reichsgesundheitsamt sich dieser Dinge angenommen und den Wünschelrutengängern Gelegenheit zur Beweisführung gegeben hat. Da das Ergebnis dieses Versuches negativ ausfiel, sind wir berechtigt, bis auf weiteres die Wünschelrute nicht als geeignetes Mittel zum Nachweis von Strahlungen anzuerkennen, ebensowenig wie das siderische Pendel. Die Zitierung solcher Phänomene im Rahmen wissenschaftlicher Abhandlungen ist durchaus kein Beweis naturnaher und volksverbundener Denkweise!

Mit den Erdstrahlen (denn um diese handelt es sich im wesentlichen bei dieser Auseinandersetzung) wurde in den Köpfen von geistig und leider auch materiell Minderbemittelten großer Unfug angerichtet. Eine Zeitlang hat sich eine blühende „Entstrahlungsindustrie" entwickelt, die mit geringsten Selbstkosten teure Appa-

rate herstellte und verkaufte. Häuser und ganze Gelände wurden entwertet und mancherlei Krankheitserscheinungen sollten angeblich durch Erdstrahlen bedingt sein. Wenn im Stall eines Bauern immer wieder dieselben Viehkrankheiten auftreten und vielleicht das Vieh im ganzen nicht gedeiht, oder wenn sich in einem Hause Krebserkrankungen häufen, so kann man darüber Dutzende von Hypothesen aufstellen, und es ist sicher von größtem wissenschaftlichem und praktischem Interesse, diesen Erscheinungen nachzugehen und sie einer Klärung zuzuführen. Aber hierbei sind die schärfsten Kontrollmaßnahmen gerade ausreichend, und erst mehrfach gesicherte Ergebnisse dürfen den Weg in die Öffentlichkeit finden. Die Erdstrahlleute haben sich — das ist das mildeste Urteil — die Sache gar zu bequem gemacht.

Wenn wir dabei an manche Erscheinungen innerhalb der Naturwissenschaften denken, an fernerliegende, aber auch an solche, bei denen die Entdeckung von Strahlungen eine Rolle spielte — die mit der Wünschelrute erfaßte Strahlung verschiedener Substanzen, bei der sogar der Nachweis von Brechungsgesetzen behauptet wurde, ferner die in Wyk auf Föhr „entdeckte“ Strahlung des Meerwassers, mit der die heilsame Wirkung des Seebades „erklärt“ wurde, die sich aber als Schmutzeffekt erwiesen hat —, so sehen wir, daß es sich dabei keineswegs um das Problem „hie Wissenschaftler — hie Laie“ handelt, vielmehr geht es hier um das übergeordnete Problem des ernsthaften, sich jederzeit nachkontrollierenden, sich nie begnügenden und nicht auf billige äußerliche Erfolge gerichteten Strebens nach Erkenntnis der natürlichen Zusammenhänge.

Organismenstrahlung

Von Professor Dr. W. Friedrich und Dozent Dr. H. Schreiber

Die an Lebewesen beobachteten Strahlungserscheinungen sind grundsätzlich von zweierlei Art, je nach den Wellenlängen, die die ausgesandte Strahlung besitzt. Auf das sichtbare Spektralgebiet entfallen die Erscheinungen der Biolumineszenz, wie man die Erzeugung von Licht bei vielen Tieren und Pflanzen nennt, und im unsichtbaren Ultravioletten spielen sich die Erscheinungen der sogenannten mitogenetischen Strahlung ab.

Daß Organismen der verschiedensten Art Licht zu erzeugen vermögen, ist schon seit langer Zeit bekannt. Nähere Untersuchungen und die weitgehende Aufklärung der Vorgänge beim Erzeugen des tierischen Leuchtens blieben dagegen der jüngsten Zeit vorbehalten. Aber auch der Gedanke, daß von lebenden Wesen außer der sichtbaren Strahlung, wie man sie z. B. an schönen Sommerabenden bei Glühwürmchen beobachten kann, unsichtbare Strahlen ausgesandt werden, ist keineswegs erst in letzter Zeit aufgetaucht. Eine ganze Reihe von Forschern hat sich seit mehr als hundert Jahren damit befaßt, durch Experimente die Existenz unsichtbarer Organismenstrahlen nachzuweisen. Als um die Wende des 19. Jahrhunderts Freiherr von Reichenbach gefunden hatte, daß besonders sensible Personen die „Od-Strahlen" auszusenden vermögen, fand er bald einen sehr großen Kreis von Anhängern seiner Lehre. Noch größeres Aufsehen erregte es, als der französische Physiker Blondlot um die Wende des 20. Jahrhunderts in der Pariser Akademie über seine N-Strahlen berichtete. Auch die N-Strahlen sollten von Organismen, aber auch von anorganischen Stoffen ausgesandt werden. Beim Tode der emittierenden Lebewesen sollte ihre Fähigkeit, diese Strahlung auszusenden, verschwinden. Blondlots Entdeckungen wurden zunächst von einer ganzen Reihe von namhaften Wissenschaftlern (z. B. auch von Becquerel, dem Entdecker der Radioaktivität) bestätigt, aber bald wurden Bedenken laut, die so schwerwiegend waren, daß sich die Lehre von den N-Strahlen nicht halten konnte.

Außer diesen beiden namentlich angeführten Forschern hat in den vergangenen Jahrzehnten noch so manche von anderen aufgestellte Lehre von Organismenstrahlen der verschiedensten Art ihre Anhänger gefunden. Es ist dies nicht

so verwunderlich, wenn man bedenkt, daß sich alle diese Erscheinungen in einem Gebiet des wissenschaftlichen Forschens abspielen sollten, in dem sich die experimentellen Untersuchungsmethoden an der Grenze ihrer Leistungsfähigkeit befinden oder gar ganz versagen.

Die Erscheinungen der Biolumineszenz

Es gibt nur wenige Gegenstände, die bei Vertretern so vieler verschiedener Wissenszweige Beachtung und Interesse erregten wie die Biolumineszenz, das bisweilen in der belebten Natur auftretende kalte Leuchten. Neben Biologen haben sich Physiker, Chemiker und auch Beleuchtungstechniker bemüht, ihre Probleme zu klären und sie ihren Zwecken nutzbar zu machen.

Die Biolumineszenz ist in der Natur ziemlich weit verbreitet. Die leuchtenden Lebewesen gehören recht verschiedenen Gruppen der Tier- und Pflanzenwelt an. Während man aber im Tierreich leuchtende Organismen von den einzelligen Lebewesen, den Protozoen, an über Quallen, Weichtiere, Stachelhäuter, Insekten usw. bis hinauf zu den Fischen vorfinden kann, ist im Pflanzenreiche das Vermögen, Licht auszusenden, nur auf die niederen Organisationsstufen, nämlich Bakterien, Algen und Pilze beschränkt. In wie weit bei manchen höheren Tieren für das Leuchten eine Symbiose, ein Zusammenleben mit Leuchtbakterien verantwortlich zu machen ist, soll hier nicht weiter erörtert werden.

Abb. 1. Schnitt durch das Leuchtepithel von Chaetopterus. (Nach Dahlgren.)
CU = Cuticula, LC = Leuchtzellen, DLC = entleerte Leuchtzellen, MC = Schleimzellen

Die leuchtenden Organismen kann man in zwei Klassen einteilen, je nachdem sich die Leuchterscheinung vollkommen innerhalb ihrer Zellen abspielt (intrazellulare Lumineszenz), oder ob von einzelnen bestimmten Drüsenzellen Leuchtmaterie nach außen abgesondert wird (extrazellulare Lumineszenz). Der biologische Vorgang bei der letzteren wird durch die Abbildung 1 veranschaulicht, die einen Schnitt durch die leuchtende Hautschicht eines Tausendfüßlers zeigt.

Gewisse Zellen der Haut besitzen die Fähigkeit, ein Leuchtsekret auszusondern, das dann, mit Schleim vermischt, über die Körperoberfläche verteilt wird. Auf dem Bild sind solche Leuchtzellen in ihren verschiedenen Stadien gut zu erkennen. Es ist natürlich klar, daß wegen der verhältnismäßig leichten Gewinnbarkeit der leuchtenden Materie Organismen mit extrazellularer Lumineszenz für chemische Untersuchungen besonders geeignet sind. Es wurden daher die wichtigsten Erkenntnisse über die für das Leuchten verantwortlichen chemischen Reaktionen an zwei Vertretern jener Klasse, nämlich an Cypridina, einem Krebs, und Pholas, einer Muschel, gewonnen.

Für physikalische oder anders gerichtete Untersuchungen sind dagegen auch Leuchtorganismen mit intrazellularer Lumineszenz von Bedeutung. Auch bei ihnen sind für die Erzeugung des Lichtes ganz besondere Zellen vorhanden. Jedoch spielen sich die Vorgänge, die zur Lichtaussendung führen, vollkommen innerhalb dieser Zellen ab; nach außen wird kein Leuchtstoff abgegeben. Besonders bei den Vertretern dieser Klasse findet man die mannigfachsten Arten von Leuchtorganen. Die höher entwickelten Formen (Insekten und Tiefseefische) sind oft mit höchst komplizierten „Lampen“ ausgerüstet, die mit — manchmal sogar beweglichen — Reflektoren, Linsen, Spektralfiltern oder Verdunklungseinrichtungen versehen sein können. Als Studienobjekt besonders geeignet sind von den Lebewesen mit intrazellularer Lumineszenz jedoch nur die Leuchtbakterien und die Leuchtkäfer.

Besonders die Leuchtbakterien, die sich leicht auf verwesendem Fleisch entwickeln und in einfacher Weise weitergezüchtet werden können, sind oft für physikalische Untersuchungen benutzt worden. Das von ihnen ausgesandte Licht besteht, wie auch bei den anderen Leuchtbakterien, aus einem kontinuierlichen Spektralband, das ganz im Sichtbaren liegt und keinerlei Banden oder Linien aufweist. Die Farbe des Lichtes wechselt je nach Aufenthaltsort und Lebensweise der betreffenden Tiere zwischen bläulich bis gelblich. Meeresbewohner bevorzugen meist blau. Für blaues Licht besitzen dicke Wasserschichten die größte Durchlässigkeit. Land- und Luftbewohner senden dagegen meist Licht mit einem Intensitätsmaximum im Grünen aus. Das menschliche Auge besitzt seine größte Empfindlichkeit im grünen und wohl auch das tierische Auge ist ebenso wie das menschliche auf das Licht der Sonne mit seinem Intensitätsmaximum im Grünen abgestimmt.

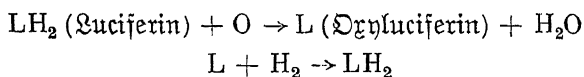
Über die Aussendung von unsichtbaren Strahlen, etwa von Ultrarot, Ultraviolett oder noch kürzeren Wellenlängen, ist bei keiner einzigen Form etwas bekannt. Die Fälle, in denen bei Leuchttieren angeblich kurzwellige Strahlung gefunden sein sollte, konnten sämtlich auf unreine Versuchsbedingungen zurückgeführt werden. Das tierische Licht unterscheidet sich in seinen Eigenschaften nicht von anderem gewöhnlichen Licht entsprechender Wellenlänge. Es kann polarisiert, reflektiert oder gebrochen werden und vermag auch, seinen Wellen-

längen entsprechend, photochemische Wirkungen auszuüben. Seine Intensität schwankt bei den verschiedenen Lebewesen beträchtlich. Bei der Feuerfliege (Photinus pyralis) ergaben Messungen eine Helligkeit von etwa 0,03 HK/cm^2 das Licht der Leuchtbakterien ist noch um einige Größenordnungen schwächer und beträgt etwa 1 Millionstel bis $^1/_{10}$ Millionstel HK/cm^2.

Die chemischen Vorgänge, auf denen die Erscheinungen der Biolumineszenz beruhen, sind vor allem durch Dubois, Harvey und andere Forscher teilweise aufgeklärt worden. Es konnte nachgewiesen werden, daß dem Leuchtvorgang eine katalytisch beschleunigte Oxydation zugrunde liegt. Die oxydierbare Substanz wurde von Dubois Luciferin genannt; als Katalysator bzw. als Enzym wird die Luciferase angenommen. Beide Stoffe, über deren chemische Natur noch nichts näheres bekannt ist, können aus einem Leuchtorganismus extrahiert und in Reagenzglasversuchen weiterstudiert werden. Luciferin ist im Gegensatz zu Luciferase temperaturbeständig, so daß es sich durch Aufkochen des Extraktes isolieren läßt. Luciferase wird gewonnen, indem der Kaltwasserextrakt der Leuchtdrüsen einfach bis zur völligen Oxydation des Luciferins stehengelassen wird. Luciferin und Luciferase werden durch saure Hydrolyse zerlegt und durch einige Enzyme verdaut. Luciferase besitzt die Eigenschaften eines Albumins, während Luciferin den Peptonen nahesteht.

Werden Luciferin und Luciferase in Gegenwart von Wasser und freiem Sauerstoff zusammengebracht, so oxydiert sich das Luciferin zu Oxyluciferin, wobei gleichzeitig Licht ausgesandt wird. Durch reduzierende Substanzen wird sowohl im lebenden Organismus als auch in der Lösung das Oxyluciferin wieder in Luciferin zurückverwandelt. Die Gegenwart von Luciferase ist hierbei für den Vorgang der Lichterzeugung unbedingt notwendig; sie kann durch kein anderes Oxydationsmittel ersetzt werden. Die Helligkeit des ausgesandten Lichtes wird durch die Geschwindigkeit bestimmt, mit der die Reaktion abläuft. Die Lichtfarbe ist, wie durch Versuche mit Luciferinen und Luciferasen verschiedener Herkunft gezeigt werden konnte, unabhängig von der Natur des Enzyms.

Für die chemischen Vorgänge bei der Lichtentwicklung hat Harvey folgendes Schema aufgestellt:

$$LH_2 \text{ (Luciferin)} + O \rightarrow L \text{ (Oxyluciferin)} + H_2O$$
$$L + H_2 \rightarrow LH_2$$

Bei dem ersten Vorgang ist für die Lichtentwicklung die Gegenwart von Luciferase erforderlich. Der hierbei nötige Partialdruck des Sauerstoffs ist äußerst gering. Leuchtbakterien, die von Harvey in einer Wasserstoff-Sauerstoff-Atmosphäre gezüchtet wurden, büßten ihre Leuchtfähigkeit erst ein, als der Sauerstoffgehalt auf weniger als 0,0007% erniedrigt wurde (dies entspricht etwa einem Sauerstoffdruck von 0,0053 mm). Wurde der Sauerstoffgehalt erhöht, so stieg auch die Stärke des Leuchtens, bis sie bei einem bestimmten Sauerstoff-

druck ihren höchsten Wert erreichte. Man kann diese Eigenschaft der Leuchtbakterien, noch auf geringste Mengen von Sauerstoff mit Aufleuchten zu reagieren, als Indikator benützen und verfügt so über ein Reagenz auf Sauerstoff mit einer so großen Empfindlichkeit, wie sie auf chemischem Wege nicht erreicht werden kann.

Abb. 2. Spektrale Energieverteilung des Lichtes einer Feuerfliege (äußere Kurve) und die vom menschlichen Auge ausgenutzte Energie (schraffiert). (Nutzeffekt etwa 96%. Nach Lenard-Schmidt-Tomaschek)

Sowohl in physikalischer, als auch in chemischer Hinsicht stellen also die Erscheinungen der Biolumineszenz eine höchst zweckmäßige Lösung des Problems der Erzeugung von sichtbarem Licht dar. Sparsam in chemischer Hinsicht ist hier die Natur, da immer das gleiche Brennmaterial verwendet wird, indem das gleiche Luciferin immer wieder oxydiert und reduziert wird. Fast die gesamte bei der chemischen Reaktion freiwerdende Energie wird in Licht umgewandelt, das den Bedürfnissen des Lebens weitgehend angepaßt ist. Berücksichtigt man die Empfindlichkeit des Auges für die verschiedenen Wellenlängen, so ergibt sich z. B. bei der Feuerfliege, daß bis zu 96% der ausgestrahlten Lichtenergie auch wirklich visuell ausgenützt werden. In der Abbildung 2 ist durch die beiden Kurvenzüge einmal die spektrale Energieverteilung des Lichtes einer Feuerfliege und einmal die vom menschlichen Auge ausgenutzte Energie abgebildet. Das schraffierte Gebiet stellt die ausgenutzte Energie des tierischen Lichtes dar, nur der schmale weiße Streifen zwischen der äußeren und inneren Kurve stellt die nicht gebrauchte Lichtenergie dar. Für einen von dem Menschen hergestellten Leuchtkörper zeigt die Abbildung 3 die entsprechenden Verhältnisse. Man erkennt auf den ersten Blick, daß hier fast die ganze von einer Kohlefadenlampe ausgesandte Strahlenenergie für das menschliche Auge nutzlos ist. Genauere Messung zeigt auch, daß nur 0,4% der Strahlungsenergie einer Kohlefadenlampe visuell ausnutzbar sind; bei einer gasgefüllten Metallfadenlampe beträgt der Nutzeffekt auch nur 3,2%. Auch hier ist die Natur also wie auf so vielen Gebieten aller menschlichen Technik noch weit überlegen.

Abb. 3. Spektrale Energieverteilung des Lichtes einer Kohlefadenlampe und die vom menschlichen Auge ausgenutzte Energie (schraffiert). Nutzeffekt etwa 0,4%. (Nach Lenard-Schmidt-Tomaschek)

Die mitogenetische Strahlung

Die zweite biologische Strahlenart, die mitogenetische Strahlung hat mit den Erscheinungen der Biolumineszenz hinsichtlich ihrer Bedeutung für die betreffenden Organismen keine Berührungspunkte. Läßt uns die Biolumineszenz ganz allgemein das auf einige Tier- und Pflanzengruppen beschränkte Vermögen ganzer Organismen erkennen, zueinander in irgendwelche Beziehungen zu treten, so ist die mitogenetische Strahlung nach Ansicht ihres Entdeckers, des russischen Histologen Gurwitsch, ein universeller Faktor, der bei der Vermehrung der Bausteine eines jeden Organismus, der Zellen, eine maßgebende Rolle spielt.

Abb. 4. Zellteilungsbilder in der Hornhaut eines Frosches, etwa 1400mal vergrößert. (Nach Szymonowicz.) a Zelle mit Kern während der Ruhe, b dichter Knäuel, Spiremstadium, c lockerer Knäuel, d Mutterstern von oben, e Mutterstern von der Seite, f Tochtersterne, g Tochtersterne, h Tochtersterne

Die Zellen, aus denen jeder tierische oder pflanzliche Organismus aufgebaut ist, besitzen gewisse gemeinsame Merkmale. Die hauptsächlichsten Bestandteile einer Zelle sind bekanntlich der Zellkern und der Zellkörper. Wie der gesamte Organismus lebt auch eine einzelne Zelle. Sie kann sich in verschiedener Weise bewegen und spricht auf äußere Reize an, mögen sie nun mechanischer, thermischer, chemischer oder irgendwie anderer Art sein. Eine Zelle kann die ihr zugeführten Nahrungsstoffe aufnehmen und verarbeiten und sie kann sich durch Teilung fortpflanzen. Man kann hier eine direkte Teilung oder Amitose und eine indirekte Teilung oder Mitose (auch Cariokinese) unterscheiden. Amitose ist dadurch gekennzeichnet, daß sich die Zelle ohne wesentliche innere Veränderungen ihres Kernes spaltet. Bei der normalen Form der Zellteilung, der Mitose, dagegen treten komplizierte innere Vorgänge auf, in deren Verlauf die Kernsubstanz in zwei vollkommen gleichen Hälften auf die beiden Tochterzellen übertragen wird. Die Abbildung 4 zeigt etwas schematisiert die einzelnen Teilungsphasen bei der Mitose eines Zellkernes im Hornhautepithel eines Frosches. Wir können hier natürlich nicht auf den Verlauf der Mitose näher eingehen, an Hand

der Abbildung möge sich der Leser selbst ein Bild machen, wie aus einer Zelle mit Ruhekern (Abb. 4a) allmählich zwei Tochterzellen (Abb. 4h) entstehen.

Die Teilung der Zellen ist schon seit etwa 5 Jahrzehnten erforscht und morphologisch bekannt, aber das Problem der ursächlichen Bedingungen für die Teilung einer Zelle ist bis heute noch nicht befriedigend gelöst. Auf besondere Schwierigkeiten stieß schon von jeher die Klärung der Frage nach den Ursachen von Zellteilungen, bei denen ein exogener Reiz angenommen werden mußte, wie z. B. bei Regenerationsmitosen. Wird nämlich ein Gewebe — etwa die Hornhaut oder Cornea eines Froschauges — verletzt, so treten, indem die Natur durch verstärktes Wachstum des an die Wunde grenzenden Gewebes bemüht ist, den Schaden zu beheben, um die Wunde herum Mitosen in anormaler Häufigkeit auf. Die Erklärung dieses Phänomens wurde von Haberlandt und Gurwitsch versucht. Haberlandt konnte zeigen, daß chemisch wirksame Reizstoffe, die bei Verwundungen (Wundhormone) oder auch beim Absterben von Zellen (Nekrohormone) entstehen, imstande sind, Zellteilungen auszulösen. Gurwitsch dagegen kam auf Grund theoretischer Überlegungen zu einer ganz anderen Erklärung der ursächlichen Bedingungen für die Mitosen und die Zellteilung.

Ausgehend von der von Driesch gewonnenen Erkenntnis daß das „Schicksal eines Teiles eines Embryos im allgemeinen Funktion seiner Beziehungen zum Ganzen“ ist, stellte Gurwitsch im Jahre 1922 die Annahme der Existenz eines embryonalen Feldes auf, wobei er unter Feld – in physikalischem Sinne – einen begrenzten Raum verstand, in dem die Summe aller Einwirkungen auf ein Objekt – in diesem besonderen Fall eine Embryozelle – durch seinen Ort eindeutig gegeben ist. Zur Stützung und Weiterentwicklung dieser Annahme wurden in der Folgezeit systematische Versuche angestellt, der Begriff dieses „Feldes“ immer enger umgrenzt und sein Inhalt näher festgelegt. Die ersten Versuche betrafen die Cornea des Froschauges. Wurde diese durch eine kleine Brandwunde verletzt, so reagierte das Corneaepithel, wie schon bekannt war, darauf nach einiger Zeit mit intensiver Mitosenbildung, die sich auf die ganze Hornhaut erstreckte. Wurde dagegen gleichzeitig möglichst schonend noch eine schmale strichförmige Wunde gesetzt, so entstand eine an der Mitosenverteilung kenntliche „Schattenwirkung der länglichen Wunde, genau so, als ob der von der Brandwunde ausgehende mitotische Reiz eine Strahlung wäre, für die sich die andere Wunde als halbdurchlässiger Schirm verhielt.“ In der Abbildung 5 bedeuten die Punkte die Mitosen bzw. ihre Verteilung in dem Cornealepithel. Man erkennt die runde Brandwunde und die gleichzeitig gesetzte strichförmige zweite Wunde.

Durch dieses Versuchsergebnis war nach Gurwitsch der Strahlungscharakter des von der Brandwunde ausgehenden mitotischen Reizes wahrscheinlich gemacht worden. Mitogenetisch, das ist Mitosen erzeugend, sollte diese neue Strahlung nur dann wirken, wenn sie auf teilungsfähige Zellen auftrifft. Nach den

Vorstellungen der Gurwitschschen Theorie entsteht die Zellteilung demnach als Ergebnis des Zusammenwirkens zweier Faktoren oder zweier Gruppen von Faktoren, der „Bereitschaftsfaktoren" und der „Verwirklichungsfaktoren". Beide sind voneinander unabhängig und nicht unbedingt mit der Entwicklung oder mit der Lebenstätigkeit einer Zelle notwendig verbunden. Die Zellteilung wäre also ein reaktiver Prozeß; der Verwirklichungsfaktor käme von außen in die Zelle hinein und selbst, wenn er in der sich teilenden Zelle entstehen würde, wäre er nur zufällig mit ihr räumlich verbunden. Absolut bleibt er sowohl für den Bereitschaftsfaktor, als auch für die ganze Zelle stets exogen.

Abb. 5. Mitosenverteilung in der verwundeten Hornhaut eines Frosches. (Nach Gurwitsch)

Durch das Ergebnis des Corneaversuches war die Überzeugung gewonnen worden, daß der mitotische Reiz ein oszillatorischer Prozeß sei. Es lag deshalb die Annahme nahe, daß er sich nicht nur innerhalb lebender Gewebe, sondern auch außerhalb derselben im Raume fortpflanze. Zur experimentellen Prüfung erschienen besonders Zwiebelwurzeln geeignet, an denen später überhaupt viele mitogenetische Ergebnisse gewonnen wurden.

Wenn man das Wachstum einer beliebigen Wurzel untersucht, so findet man, daß es sich aus zwei Komponenten, dem Teilungs- und dem Streckungswachstum zusammensetzt. Zellteilungen (Mitosen) treten fast nur in einer an der Wurzelspitze gelegenen, etwa 1–5 mm breiten Zone, dem Meristem, auf. In

den übrigen Teilen der Wurzel findet ausschließlich Streckungswachstum statt d. h. die im Meristem neugebildeten Zellen vergrößern sich allmählich, ohne sich wieder zu teilen. Wenn also die mitogenetische Strahlung an Zwiebelwurzeln nachgewiesen werden sollte, so konnte nur das Meristem als Meßinstrument in Frage kommen. Die Abbildung 6 zeigt die experimentelle Anordnung des sogenannten Fundamentalversuches von Gurwitsch zum Nachweis der mitogenetischen Strahlung an Zwiebelwurzeln. Zwei Zwiebeln werden so angeordnet, daß je eine ihrer Wurzeln senkrecht zueinander mittels Glaskapillaren festgelegt werden kann. Die eine Wurzel dient als Meßinstrument, als Detektor für die Strahlung, während die andere, deren Spitze mikroskopisch auf die Wachstumszone der ersten eingestellt ist, den Induktor darstellt, also mitogenetische Strahlen aussenden soll. Die beiden Wurzeln werden nach erfolgter Einstellung einige Zeit sich selbst überlassen. Hierauf

Abb. 6. Mitogenetischer Induktionsversuch mit zwei Zwiebelwurzeln. (Nach Reiter und Gabor)

wird die Detektorwurzel in mikroskopische Längsschnitte — manche Forscher zogen im Gegensatz zu Gurwitsch Querschnitte vor — zerlegt und die Mitosenzahl und -verteilung im Meristem bestimmt. Unter der Annahme, daß bei unbeeinflußten Wurzeln die Mitosenverteilung stets radiärsymmetrisch zur Wurzelachse ist, rechnet nun ein Überwiegen der Mitosen an der dem Induktor zugewendeten Seite als positives Ergebnis, während symmetrische Verteilung als negatives Resultat gebucht wird. Eine Verarmung der zugewendeten Seite an Mitosen, die besonders bei langer Versuchsdauer gefunden wurde, wird durch „mitogenetische Erschöpfung" erklärt. Die Abbildung 7 zeigt den Querschnitt einer mitogenetisch induzierten Zwiebelwurzel mit starkem positivem Ausschlag.

Abb. 7. Mikrophotographie eines mitogenetisch beeinflußten Wurzelquerschnittes. Oben die dem Induktor zugewendete, unten die abgewendete Seite. Sehr starker Ausschlag. (Nach Reiter und Gabor)

Bei dem weiteren Zusammentragen mitogenetischer Einzelergebnisse wurde

bald eine große Reihe von biologischen Strahlenquellen gefunden. Sowohl Protisten der verschiedensten Art, als auch Seeigel- und Amphibieneier zeigten das Vermögen, mitogenetische Strahlung auszusenden. Aber auch flüssige Extrakte und Körpersäfte, Gewebsbreie und Organstücke, ja sogar chemische Stoffe erwiesen sich als imstande, andere biologische Objekte mitogenetisch zu beeinflussen. Es war deshalb eine sehr wichtige und dringende Aufgabe, sich mit der Erforschung derjenigen Phasen des physiologischen Zellgeschehens zu befassen, denen diese eigenartige von den verschiedensten lebenden Zellen ausgesandte Strahlung ihre Entstehung verdankt. Die Vermutung lag nahe, daß die Ursache der Entstehung der mitogenetischen Strahlen in den biologischen Quellen in energieliefernden chemischen Vorgängen zu suchen ist, im wesentlichen in Spaltungsprozessen, und demnach als eine Art von Chemolumineszenz aufgefaßt werden muß. Von Gurwitsch angestellte Versuche zeigten, daß sich ähnlich wie bei der schon besprochenen Biolumineszenz auch bei der mitogenetischen Strahlung das wirksame Prinzip der Zwiebelstrahlung in zwei Fraktionen teilen läßt, die er in Anlehnung an Harveys Luciferin und Luciferase als Mitotin und Mitotase bezeichnete. Genau so wie die Luciferase stellt, wie Gurwitsch zeigte, die Mitotase ein temperaturunbeständiges Oxydationsferment dar, während das Mitotin sich als temperaturbeständig erwies. Beim Zusammenmischen von Mitotin und Mitotase erhielt Gurwitsch die Strahlung; er nahm an, daß dieser Vorgang auf einer Oxydation des Mitotins beruhe.

Auch spätere Arbeiten aus der Gurwitschschen Schule konnten weitere Anhaltspunkte für einen Zusammenhang zwischen Oxydationsvorgängen im biologischen Objekt und dem Entstehen der mitogenetischen Strahlung wahrscheinlich machen. Hierauf deuten z. B. die Befunde, daß die Strahlung in gewissen Fällen durch Zusatz von Zyanid unterdrückt werden kann, daß sie ausbleibt, wenn die aussendenden Zellen narkotisiert werden, und daß die Strahlung des Blutes fehlt, wenn dieses mit Kohlensäure gesättigt ist.

Ergebnisse anderer Versuche deuteten jedoch auch darauf hin, daß außer den Oxydationsvorgängen noch andere chemische Umsetzungen in der Zelle für das Auftreten der mitogenetischen Strahlung bedeutsam sein können. So wurde z. B. gefunden, daß bei der Glykolyse, dem anaeroben Abbau von Kohlehydraten und auch bei der Proteolyse, der Verdauung von Eiweiß eine kräftige Strahlung auftritt. Auch bei dem enzymatischen Abbau der Nukleinsäure und des Lezithins sowie bei einer ganzen Reihe von anderen biochemischen Vorgängen konnte die Entstehung einer mitogenetischen Strahlung nachgewiesen werden. Neben den in einem Organismus normalerweise ablaufenden biochemischen Vorgängen konnten darüber hinaus auch eine Reihe chemischer Reaktionen im Reagenzglas als Quelle mitogenetischer Ausstrahlung sichergestellt werden.

Die bei den verschiedenen Vorgängen ausgesandten Strahlungen unterscheiden sich voneinander durch ihre spektrale Zusammensetzung. Von einer

Strahlenquelle wird nämlich in dem Wellenlängengebiet von etwa 180 bis 250 mμ, das für die mitogenetische Strahlung in Anspruch genommen wird, jeweils ein ganz bestimmtes Linien- bzw. Bandenspektrum ausgesandt. Die Feststellung dieser verschiedenen mitogenetischen Spektren erfolgte auf die Weise, daß die Photoplatte eines Quarzspektrographen durch eine in einzelne Bezirke unterteilte Hefekultur ersetzt wurde, während sich vor dem Eintrittsspalt des Spektrographen der zur Untersuchung gelangende Vorgang abspielte. Wie wir bei der Besprechung der verschiedenen Nachweismethoden noch sehen werden, hat nämlich die mitogenetische Strahlung die Eigenschaft, das Teilungswachstum von Hefezellen zu beschleunigen. An den Stellen der Hefekultur, auf die mitogenetische Spektrallinien fallen, tritt also gegenüber der Umgebung ein verstärktes Wachstum auf. Die Abbildung 8 bringt eine Zusammenstellung der bis jetzt bekannten mitogenetischen Spektren.

Abb. 8. Mitogenetische Spektren. (Nach Hollaender aus Duggar, Biological Effects of Radiation).
1. Reduktion von Cu'' zu Cu, 2. Reduktion von Zn'' zu Zn, 3. Reduktion von Hg'' zu Hg, 4. Reaktion: $HCl + Al$, 5a. Reduktion $O_2 \longrightarrow O''$, 5b. $H \longrightarrow H_2$, 6. $Fe_2(SO_4)_3 + FeSO_4$, 7. $K_2Cr_2O_7 + FeSO_4$, 8. $FeCl_3 + NH_2OH \cdot HCl$, 9. $KMnO_4 + H_2O_2$, 10. $HgCl_2 + SnCl_2$, 11. $HNO_3 + FeSO_4$ $(+ H_2SO_4)$, 12. $KClO_3 + Zn + NaOH$, 13. $Pt + H_2O_2$, 14. KOH + Pyrogallol, 15. $NaOH + HCl$, 17. Glykolyse, Blutstrahlung, 18. Phosphatase, 19. Zerfall von Kreatinphosphorsäure, 20. Eiweißverdauung, 21. Amylase und Maltose, 22. Rohrzucker und Hefesaccharase, 23. Harnstoff und Urease, 24. Nerv im Ruhezustand, 25. Nervenmark, 26. Nerv, mechanisch gereizt, am Punkt der Reizung, 27. Nerv, elektrisch gereizt, zwischen den Elektroden, 28. Nerv, Wundreiz, von der Wunde ausgehend, 29. Nerv, elektrisch gereizt, von den Elektroden ausgehend, 30. Nerv, Fortleitung des Reizes, 31. Kleinhirn, 32. Großhirn, 33. Nervus opticus.

Es ist natürlich klar, daß die Methode der mitogenetischen Spektralanalyse, wie man die Aufnahme der mitogenetischen Spektren nennt, ungeahnte Forschungsmöglichkeiten in sich birgt. Bietet sie doch eine Möglichkeit, die Natur von Vorgängen, die sich in einem biologischen Objekt abspielen und an die man auf keine andere Weise gelangen kann, weitgehend aufzuklären.

Wenn wir nun im folgenden dazu übergehen wollen, eine Reihe von mitogenetischen Strahlungsquellen etwas ausführlicher zu besprechen, so muß im vornhinein darüber Klarheit herrschen, daß dies nur eine kleine Auswahl sein kann. In den 14 Jahren, die seit der Entdeckung der mitogenetischen Strahlung verflossen sind, sind von den verschiedensten Seiten eine solche Fülle von sich zum Teil auch widersprechenden Einzelresultaten zusammengetragen worden, daß eine einigermaßen vollständige Übersicht einen weit größeren Raum beanspruchen würde, als uns hier zur Verfügung steht.

Besonders aufschlußreich für die Theorie des mitogenetischen Feldes waren Untersuchungen, die besonders von Baron an Hefekulturen durchgeführt wurden. Für den Lebenszyklus einer Hefezelle, wie überhaupt für den eines Einzellers, läßt sich auf Grund seiner Versuche etwa folgendes Bild entwerfen. Eine junge Zelle reift allmählich bis zur nächsten Zellteilung, die hier durch eine Sprossung erfolgt, heran. Dabei werden gewisse „mitogene" Stoffe aufgespeichert oder gebildet, und zwar so lange, bis deren Konzentration so groß geworden ist, daß die Reaktion eingeleitet wird, die zur Aussendung der mitogenetischen Strahlung führt. Dieses „Aufleuchten" der Zelle bedeutet nun den eigentlichen notwendigen Anstoß zur Teilung entweder für die Zelle selbst (man spricht dann von Autoinduktion) oder für eine benachbarte Zelle (in diesem Falle liegt Mutoinduktion vor).

Genau so wie in der Hefekultur werden auch in einem selbständigen Organismus Teilungsprozesse stets von einer mitogenetischen Ausstrahlung begleitet. Sie setzt sich nach Gurwitsch aus zwei verschiedenen Teilprozessen zusammen, der primären und der sekundären Ausstrahlung. Die primäre Ausstrahlung ist ein kurzzeitiges Aufleuchten der Zelle, kurz bevor die Teilung eingeleitet wird; man spricht deshalb auch von einem prämitotischen Aufleuchten. Es ist mit dem Stoffwechsel der Zelle äußerst eng verbunden.

Bei einer Hefekultur, die auf festem Agar gezüchtet wird, wird also diese primäre Ausstrahlung an denjenigen Stellen lokalisiert sein, wo die Bedingungen des Zellenstoffwechsels am günstigsten sind. Dies ist in den tieferen Zellagen, direkt an der Oberfläche des Nährbodens, der Fall. Je ungünstiger die Ernährungsbedingungen in den oberen Zellschichten werden, desto weniger besitzen die Zellen die Fähigkeit zu einer selbständigen Ausstrahlung, bis sie dieses Vermögen überhaupt verloren haben und deshalb auch die Fähigkeit zur selbständigen Sprossung einbüßen.

Trotzdem haben die Versuche ergeben, daß auch diese nicht mehr teilungsfähigen Hefezellen aus den oberen Zellschichten der Kultur noch unter gewissen Umständen das Vermögen bewahrt haben, mitogenetische Strahlung auszusenden. Man erklärt sich diese Tatsache so, daß in diesen Zellen genügend viel Material aufgespeichert ist, durch dessen Zerfall eine Entstehung mitogenetischer Strahlung bewirkt werden kann. Nur muß dieser Zerfall von außen eingeleitet

werden. Dies geschieht, wenn die Zellen von mitogenetischer Strahlung getroffen werden, die von anderen Zellen der Kultur ausgehen. Man spricht in der mitogenetischen Literatur dann von sekundären Strahlern und meint damit solche Zellen, die zwar mitogenetisch aktiv, aber selbst nicht mehr fähig sind zur Sprossung. Solche Sekundärstrahler sind in den oberen Zellagen einer Hefeagarkultur, wo schlechtere Ernährungsverhältnisse für die Zellen vorherrschen, besonders zahlreich zu finden. Die Sekundärstrahler aus der obersten Zellschicht geben ihre Sekundärstrahlung zum Teil auch in den angrenzenden Raum ab und so kommt es, daß eine Hefeagarkultur auch auf andere in ihre Nähe gebrachte biologische Objekte überhaupt mitogenetisch wirksam sein kann.

Genau so wie in den angrenzenden Raum wird auch die Sekundärstrahlung der obersten Zellschichten in den Raum der Kultur selbst zurückgegeben. Da sie dort auf noch teilungsfähige Individuen trifft, werden diese zur Sprossung angeregt, d. h. von der Oberfläche nach dem Innern zu steigt die prozentuale Sprossung der Hefezellen stetig an. Durch gegenseitiges Wechselspiel wird schließlich in bezug auf die Sprossung je nach den allgemeinen Existenzbedingungen ein mehr oder minder hoher Sättigungsgrad der Kultur erreicht. Es ist klar, daß bei einer so gesättigten Kultur eine Stimulierung der Sprossung durch mitogenetische Bestrahlung von außen unmöglich ist. Soll eine Kultur als Indikator für mitogenetische Strahlung benutzt werden, so muß demnach darauf geachtet werden, daß nicht die günstigsten Existenzbedingungen für die Hefe vorherrschen. Je ungünstiger die Ernährungsbedingungen und je älter die Hefekultur ist, desto mehr eignet sie sich zur Verwendung als Detektor. Es ist dann nämlich ein gewisser Prozentsatz der Zellen der Kultur abgestorben oder in seinen Lebensäußerungen geschwächt. Diese Zellen können nicht nur nicht selbst mitogenetisch strahlen, sondern sie absorbieren auch die von anderen herrührende Strahlung, wodurch der Sättigungsgrad herabgesetzt wird. In einer solchen Kultur werden sich also stets latente Sekundärstrahler befinden, die von einer primären Strahlung nicht getroffen werden. Aber auch eine genügende Anzahl von teilungsfähigen, einer Anregung zugänglichen Hefezellen ist vorhanden. Wenn eine solche Kultur mitogenetisch bestrahlt wird, so werden diese latenten Sekundärstrahler aktiviert, und die von diesen ausgehende Strahlung regt dann die teilungsfähigen Zellen zu einer vorzeitigen Sprossung an. Es kommt also eine mitogenetische Wirkung zustande, die sich in einer erhöhten prozentualen Sprossung der ganzen Kultur äußert.

Die Theorie der Sekundärstrahler ist für die Auffassung des Zustandekommens eines mitogenetischen Effektes nicht nur bei einer Hefekultur, sondern auch bei anderen biologischen Objekten äußerst wichtig. Werden doch der mitogenetischen Strahlung solche ultravioletten Wellenlängen zugeordnet, die schon in allerdünnsten Schichten eines organischen Materials vollkommen absorbiert werden. Es könnte also eine von außen kommende Strahlung gar nicht bis zu der Mehr-

zahl der anregungsfähigen Zellen dringen, wenn nicht Sekundärstrahler zwischengeschaltet wären.

Die von einer Hefekultur nach außen hin abgegebene mitogenetische Strahlung geht also von Sekundärstrahlern aus, die über die Oberfläche der Kultur in verhältnismäßig großen Entfernungen voneinander verteilt sind. Zwischen ihnen liegen Zellen, die hinsichtlich der mitogenetischen Strahlung vollkommen indifferent sind. Da das Aufleuchten eines Sekundärstrahlers nur kleinste Bruchteile von Sekunden dauern kann, werden in einem gewissen Augenblick von der großen Zellenzahl auf der Kulturoberfläche stets nur einige wenige strahlen, die also räumlich ziemlich weit voneinander getrennt liegen. Auf Grund verschiedener Versuchsergebnisse wird angenommen, daß die höchste Intensität einer biologischen Strahlenquelle etwa 1000 Quanten je Sekunde und Quadratzentimeter beträgt. Es wird daher geschlossen, daß bei der Erregung eines Sekundärstrahlers unter Umständen von einem einzigen primären Quant ein ganzer Strom von sekundären Quanten ausgelöst werden kann. Für die von einer Hefekultur ausgehende Strahlung erhält man damit das Bild, daß Quantenbündel aus verhältnismäßig weit zerstreuten Stellen der Kulturoberfläche ausgehen. Dieses „Regime der mitogenetischen Ausstrahlung," wie Gurwitsch sich ausdrückt, wird hinsichtlich der räumlichen und der zeitlichen Verteilung als grob dispers bezeichnet.

Nur ein derartiges mitogenetisches Regime soll für die Erzeugung einer Induktionswirkung geeignet sein. Eine teilungsfähige Hefezelle wird nur dann zur Sprossung veranlaßt, wenn sie einseitig bestrahlt wird. Dies ist nur bei einer grob dispersen Strahlenquelle der Fall, wenn auf die Oberfläche des Detektors vereinzelte Quantenbündel auftreffen. Im Fall einer fein dispersen Strahlenquelle, wie sie etwa eine Quecksilberdampflampe darstellt, bei der jedes angeregte Molekül des Quecksilberdampfes je ein Quant aussendet, gelangen zu einer Zelle der Detektorkultur von mehreren Seiten die mitogenetisch wirksamen Quanten. In diesem Falle kann keine Sprossung erfolgen, weil dieser Reiz nicht der Stimulation in bezug auf die Sprossung angepaßt ist. Daß auch fein disperse Strahlenquellen, wie aus Versuchsergebnissen bekannt ist, eine Induktionswirkung zu erzeugen fähig sind, wird so erklärt, daß sie nur über Sekundärstrahler mittelbar wirken können.

Eine wichtige und weitgehend untersuchte mitogenetische Strahlenquelle ist weiterhin menschliches und tierisches Blut. Da Untersuchungen gezeigt hatten, daß die meisten normalen Gewebe des Wirbeltierkörpers als mitogenetische Strahler nicht in Frage kamen, war es besonders interessant, zu erfahren, wie an die verschiedenen Stellen im Organismus, an denen Zellteilungen erfolgen, der für die Teilung notwendige Faktor, die mitogenetische Strahlung, gelangt. Es zeigte sich, daß dies mit Hilfe des Blutes geschieht. Die Vorgänge, die das Blut zur Aussendung mitogenetischer Strahlung veranlassen, sind Glykolyse und

Oxydation. Von maßgebender Bedeutung sind dabei die Formelemente des Blutes, vor allem die roten Blutkörperchen, die Erythrozyten.

Das Blut gesunder Menschen und Tiere, insbesondere von Maus und Ratte, hat sich bisher als zuverlässigster Strahler erwiesen. Bei der großen Bedeutung für die Medizin sind die Verhältnisse der Blutstrahlung sehr eingehend untersucht worden. Es zeigte sich, daß beim Menschen das Strahlungsvermögen des Blutes von dem Lebensalter abhängig ist. Im höheren Alter wird die Strahlungsintensität geschwächt bzw. ganz ausgelöscht. Eine intramuskuläre Einspritzung von jugendlichem Blut, stellt die infolge des Alters verlorene Blutstrahlung wieder her.

Auch der Ernährungszustand ist für die Intensität der Blutstrahlung bedeutsam. Bei Tieren, die infolge Hungerns einen Gewichtsverlust von etwa 30% erlitten hatten, fehlte sie vollkommen. Auch schwere körperliche Arbeit führt zu einem Verschwinden der Strahlung.

Es ist auch versucht worden, die mitogenetische Strahlung des Blutes mit dem gesundheitlichen Zustand des Organismus in Zusammenhang zu bringen. Im allgemeinen hat es sich dabei gezeigt, daß weder die Schwere der Erkrankung noch der Allgemeinzustand die Blutstrahlung beeinflußt. Nur bei einigen wenigen Erkrankungen wie z. B. bei Vergiftungen, bei schwerer Sepsis und bei schweren Blutkrankheiten fehlt sie vollkommen. Das gleiche ist auch bei dem Auftreten bösartiger Geschwülste der Fall. Experimentelle Ergebnisse haben gezeigt, daß das Schwinden der Blutstrahlung das frühzeitigste Symptom dafür ist, daß der Organismus an Krebs erkrankt ist. Offenbar handelt es sich hierbei um eine Hemmungswirkung auf die der Strahlung zugrunde liegenden fermentativen Vorgänge. Man hat oft versucht, diese Feststellungen der medizinischen Frühdiagnose des Krebses nutzbar zu machen. Doch ist uns kein Fall bekannt geworden, in dem diese Versuche allgemein angewendet und zu einem Erfolge geführt haben.

Wenn auch bei Krebserkrankungen die Strahlung des Blutes fehlt, so stellt doch die Krebsgeschwulst selbst eine außerordentlich starke mitogenetische Strahlenquelle dar. Es ist dies ja auch zu erwarten, da, wie wir gesehen haben, jede Zellteilung von einem prämitotischen Aufleuchten der Zelle begleitet ist. Krebsgeschwülste sind aber unter anderem auch dadurch gekennzeichnet, daß in ihnen ein hemmungsloses Teilungswachstum der Zellen erfolgt.

Außer in bezug auf das Vermehrungsvermögen unterscheidet sich eine Krebszelle auch in ihrem Stoffwechsel von einer normalen. Eine Krebszelle hat außerdem vor allem noch die Tendenz, zu entarten und zu nekrotisieren. Besonders die Stoffwechselverhältnisse beeinflussen die mitogenetische Strahlung einer Krebszelle. Sie waren zwar durch eine Reihe bedeutsamer früherer Arbeiten schon weitgehend bekannt geworden, aber Gurwitsch konnte auf Grund seiner und anderer Versuchsergebnisse eine ganze Reihe neuer wichtiger Tatsachen erschließen.

Bei dem Stoffwechsel einer Zelle spielen die wichtigste Rolle die sogenannten Fermente oder Enzyme, das sind Stoffe, die die komplizierten organischen Verbindungen bei Gegenwart und meist auch unter Mitwirkung von Wasser in einfachere Moleküle zerspalten, ohne selbst dabei zersetzt zu werden. Über die Wirkungsweise eines Fermentes, namentlich darüber, ob es sich im gegebenen Falle innerhalb oder außerhalb einer Zelle betätigt, ist noch recht wenig bekannt. Auf mitogenetischem Wege gelangte Gurwitsch zu der Ansicht, daß die Krebszelle sich von den normalen Gewebezellen dadurch unterscheidet, daß „ihr Stoffwechsel gewissermaßen nach außen gerichtet ist.“ Eine Reihe von Spaltungsprozessen, die sich gewöhnlich innerhalb der Zelle abspielen, läuft im Krebsgewebe zum großen Teil extrazellulär ab. Die einzelnen fermentativen Spaltungen wurden mit Hilfe der mitogenetischen Spektralanalyse festgestellt und die entsprechenden Vorgänge bei normalem und bei Krebsgewebe miteinander verglichen. So konnte gezeigt werden, daß die spektrale Zusammensetzung der mitogenetischen Strahlung aus der Oberfläche einer Krebsgeschwulst und aus dem Cornealepithel miteinander übereinstimmt und glykolytischem Ursprungs ist. Wird das Tier, dessen Krebsstrahlung geprüft wurde, getötet, so verschwindet die glykolytische Strahlung des Krebses nach ganz kurzer Zeit. Wird jedoch die Krebsgeschwulst herauspräpariert und in eine Nährlösung mit Glykoselösung gebracht, so tritt sofort wieder mitogenetische Ausstrahlung auf. Bei dem normalen Cornealepithel, dessen glykolytische Strahlung ebenfalls mit dem Tode des Tieres verschwindet, ist es dagegen auf keine Weise möglich, die geschwundene Strahlung wieder hervorzurufen. Es wird daraus geschlossen, daß sich die Glykolyse beim Krebsgewebe nicht vollkommen innerhalb der Zellen abspielen kann. Das glykolytische Ferment wandert vielmehr durch die Zellwandungen in die Nährlösung; seine Wirksamkeit ist nach Gruwitsch also nicht, wie Warburg meint, an die Zellstruktur gebunden. Es kann auch in der klaren Nährlösung, in der sich vorher einige Zeit Krebsgewebe befunden hatte, mitogenetisch nachgewiesen werden.

Wie das glykolytische so wandert auch das „nukleolytische“ und das proteolytische Ferment aus den lebenden Krebszellen in die Nährlösung hinüber. Dadurch ist bewiesen, daß die Krebszelle für die verschiedenen Fermente eine bemerkenswerte Durchlässigkeit besitzt. Auch dies ist eine Eigenschaft, die Krebsgewebe von dem normalen Gewebe unterscheidet. Obwohl verschiedene normale parenchymatöse Gewebe (wie z. B. Niere, Leber, Milz) mitogenetisch untersucht wurden, konnte doch in keinem Falle festgestellt werden, daß diese nachweisbare Mengen von Fermenten an ihre Umgebung abgeben. Im Gegensatz zu dem fermentativen Umsatz der normalen Gewebe ist also der der Krebszelle nach außen eingestellt. Dieselben Spaltungsprozesse, die sonst innerhalb einer Zelle ablaufen, spielen sich bei ihr in bedeutendem Maße auch extrazellulär ab. Wenn auch, wie gezeigt werden konnte, in dem absoluten Fermentgehalte, namentlich an pro-

teolytischen Fermenten, zwischen Krebszellen und normalen Zellen kein Unterschied besteht, so ist er doch insofern vorhanden, als die Fermente in der Krebszelle stets und ausnahmslos aktiv sind, während dies in normalen Zellen in der Regel nicht der Fall ist, und sie erst von außen aktiviert werden müssen.

Da alle Fermentreaktionen mitogenetische Strahlung erzeugen, ist bei einer Krebszelle stets ein starkes mitogenetisches Feld der Umgebung vorhanden, das auch als „Kontaktfeld" bezeichnet wird. Eine Krebszelle ist also stets von ihrem eigenen mitogenetischen Feld umgeben; die anderen Meristeme, wie man Gebiete nennt, in denen Zellteilungen stattfinden, sind dagegen immer auf eine mitogenetische Strahlung angewiesen, die von außen in sie eindringt. Als Beispiel möge hier die Zwiebelwurzel angeführt werden. Ihr Meristem befindet sich in einer schmalen Zone, die einige Millimeter von dem Ende der Wurzel entfernt liegt. Die für die dort auftretenden Zellteilungen notwendige mitogenetische Strahlung hat ihren Ursprung jedoch, wie verschiedene Versuche ergaben, in der Zwiebelsohle. Sie wird von dort durch die Gefäßbündel des Wurzelschaftes bis zum Meristem geleitet, wobei die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des mitogenetischen Reizes 20 m je Sekunde beträgt.

In der Tatsache, daß eine Krebszelle ständig von ihrem mitogenetischen Eigenfeld umgeben ist, wird zumindest einer der Gründe für das uneingeschränkte, örtlich nicht gebundene Vermehrungsvermögen der Krebszelle erblickt. Die übrigen Meristeme sind auf außerhalb von ihnen gelegene Ursprungsquellen der mitogenetischen Strahlung angewiesen; daher sind auch bei ihnen die Zellteilungen örtlich fest begrenzt.

Zwischen der fermentativen Tätigkeit einer Krebszelle und der Strahlung bestehen enge Wechselbeziehungen. Genau so wie die Strahlung erst als Folge der fermentativen Reaktionen entsteht, werden andererseits als Folge der mitogenetischen Strahlung (Ultraviolett!) die fermentativen Umsätze gesteigert. Es drängen sich hier gewisse Gedankengänge über die Entstehung einer Krebszelle überhaupt auf. Wenn man zwei an sich gleiche Zellen näher betrachtet, so wird man, wie dies an einem biologischen Objekt ja nicht verwunderlich erscheint, stets gewisse kleine Unterschiede der verschiedensten Art finden. So kann z. B. die Zellwand der einen Zelle ganz geringfügig durchlässiger für Fermente sein oder sie kann vielleicht einen etwas lebhafteren Stoffwechsel aufweisen, das sind Verschiedenheiten, die an sich für die Zelle in keiner Richtung irgendwie entscheidenden Einfluß haben. Wird aber durch die Verschiedenheit der Eigenschaften bei der einen Zelle eine schwache mitogenetische Strahlung ausgelöst, so tritt hier das Wechselspiel zwischen Strahlung und fermentativen Umsätzen, das wir oben beschrieben haben, in Kraft. Die Folge ist, daß sich die beiden Faktoren gegenseitig immer mehr steigern und die davon betroffene Zelle wird sich daher allmählich aus allerbescheidensten Anfängen heraus zur voll ausgebildeten Krebszelle entwickeln, sie wird „karzinomatös entarten". Natürlich

wird diese Entwicklung nicht bei allen von der normalen Form abweichenden Zellen vor sich gehen, denn sie ist nur möglich, aber nicht notwendig. Die karzinomatöse Entartung einer Zelle ist erfahrungsgemäß ja nur ein äußerst seltenes Ereignis. Nur ein ganz verschwindender Prozentsatz aus einer sehr großen Anzahl von Zellen wird durch die gegenseitige Anregung von Fermenttätigkeit und Strahlung bis zu einer ausgesprochenen karzinomatösen Entartung gebracht werden.

Wir haben uns in den vorangehenden Anführungen auf den Standpunkt der Gurwitschschen Schule gestellt, so wie er vor allem von Gurwitsch selbst und von dem russischen Forscher Baron vertreten wird. Wir konnten dabei natürlich nur einen schmalen Ausschnitt aus dem imposanten und geistreichen Gebäude der Lehre von den mitogenetischen Strahlen geben. Aber schon diese wenigen Beispiele zeigen, daß die Entdeckung der mitogenetischen Strahlen wohl die bedeutendste Leistung in der Biologie der letzten Jahrzehnte bedeutet — falls die Existenz der Strahlung unwiderleglich und überzeugend bewiesen würde. Aber obwohl die ersten Arbeiten von Gurwitsch aus dem Jahre 1922 datieren, gibt es doch heute noch eine sehr große Anzahl von Forschern, denen die bisher beigebrachten Existenzbeweise nicht genügend erscheinen.

Wenn irgendwie zu dem Problem der mitogenetischen Strahlung kritisch Stellung genommen werden soll, so muß dies zunächst von der Detektorseite aus geschehen. Nur wenn die Zuverlässigkeit der verschiedenen Nachweismethoden, die in der mitogenetischen Forschung angewandt werden, vollkommen gesichert ist, kann ja die Erscheinungsweise der Strahlen selbst genauer erforscht werden und nur dann kann eine Nutzanwendung auf andere Forschungsgebiete erfolgen.

Die Zwiebelwurzel stellt historisch den ersten wichtigen Detektor für die mitogenetische Strahlung dar und eine ganze Reihe von wichtigen Einzelgliedern der Gurwitschschen Theorie wird auf Ergebnisse gestützt, die mit ihr erhalten wurden. Die Methodik der Zwiebelwurzel, die wir oben schon kennengelernt haben, ist vielfach nachuntersucht worden. Neben Bestätigungen der Ergebnisse aus der Gurwitschschen Schule konnten sehr oft die Nachprüfer nicht zu einer Bejahung der Existenz der mitogenetischen Strahlung gelangen. Es wurden eine ganze Reihe von Fehlerquellen gefunden, die für die Störung der radialsymmetrischen Mitosenverteilung in der angeregten Wurzel verantwortlich gemacht werden mußten. Als solche Fehlerquellen werden angeführt die Verwendung von abgeschnittenen Wurzeln als Detektoren, ihre beliebige Orientierung im Raum, das unkontrollierbare Liegenlassen nach dem Versuch in Wasser mit ungleichmäßigen Temperaturen und die geringe Anzahl von Versuchen mit einer Versuchsanordnung; alles Einwände, die sich besonders gegen die in Berlin durchgeführten Arbeiten von Reiter und Gábor richten.

Die überhaupt umfangreichste und eingehendste Prüfung der Zuverlässigkeit und Brauchbarkeit der Zwiebelwurzel als Detektor für mitogenetische Strahlung stammt von der russischen Botanikerin Moissejewa. An Hand eines sehr umfangreichen, in jahrelanger Arbeit gesammelten Materials kommt sie zu dem Schluß, daß eine Störung der Symmetrie in der Mitosenverteilung einer Wurzel ausnahmslos äußeren Faktoren, die mit der Durchführung eines Versuches verknüpft sind, zugeschrieben werden muß. Reibung und Druck der meristematischen Zone, Druck und Streckung des oberen Wurzelteiles, ungleichmäßige Beleuchtung und anderes mehr können das Versuchsergebnis beeinflussen. Aus ihren Ergebnisse, die im mitogenetischen Sinne negativ ausfielen, wenn parallellaufende Induktions- und Kontrollversuche sehr gleichmäßig und sehr vorsichtig durchgeführt wurden, zieht die Forscherin die einzig mögliche Schlußfolgerung, daß die Zwiebelwurzel nicht als Detektor für die Gurwitschstrahlung dienen kann und daß daher alle Ergebnisse, die auf dieser Arbeitsweise beruhen, als irrtümlich fallen gelassen werden müssen.

Da die Methode der Zwiebelwurzel recht umständlich und zeitraubend ist, setzte schon in den Anfängen der mitogenetischen Forschung die Suche nach einem anderen bequemer zu handhabenden Indikator auf mitogenetische Strahlung ein. Ein solcher wurde von Baron in der Hefekultur gefunden. Die weitaus überwiegende Mehrheit aller mitogenetischen Ergebnisse der letzten Jahre sind mit ihr gewonnen worden. Wir haben schon gesehen, daß die mitogenetische Strahlung die Eigenschaft besitzt, das Teilungswachstum der Hefezellen anzuregen. Werden also in einem induzierten Bezirk einer Hefekultur und in einem unbeeinflußt gebliebenen Kontrollbezirk die in Sprossung befindlichen Hefezellen unter dem Mikroskop gezählt, so kann auf das Vorhandensein oder auf das Fehlen einer mitogenetischen Strahlung geschlossen werden.

Neben der unmittelbaren mikroskopischen Auszählung haben sich besonders in letzter Zeit auch verschiedene abweichende Methoden eingebürgert. Eine in bezug auf die Sprossung angeregte Hefekultur unterscheidet sich nach einer gewissen Zeit, die dem Heranwachsen einer Sprosse zu einer erwachsenen Zelle entspricht, auch in der absoluten Zellenzahl von einer unbeeinflußt gebliebenen Kultur. Indem nun entweder die Zahl der Zellen in einer bestimmten Menge einer Nährflüssigkeit (Bierwürze) gezählt wird oder indem mittelbar durch Intensitätsbestimmung des an einer Hefeaufschwemmung gestreuten Lichtes (Trübungsmessungen mittels Nephelometer) Rückschlüsse auf die Individuenzahl gezogen werden, wird das Vorliegen eines anregenden Faktors erschlossen. Dies ist auch möglich, indem ähnlich wie bei der Blutkörperchenbestimmung eine Hefeaufschwemmung in einem graduierten Röhrchen auszentrifugiert wird und dann die Höhe der Hefezellensäule der induzierten Aufschwemmung mit der einer unbeeinflußten Kontrolle verglichen wird.

Eine andere Methode zum Nachweis der mitogenetischen Strahlung beruht

schließlich auf der direkten Beobachtung des Wachstums einzelner Hefezellen unter dem Mikroskop. Die Abbildung 9 möge von dieser Methode eine Vorstellung vermitteln. Die auf einem Agarnährboden befindlichen Hefezellen werden mittels einer Mikrokamera in regelmäßigen zeitlichen Abständen photographiert und das Wachstum bestimmter induzierter und unbeeinflußter Zellen wird miteinander verglichen.

a b c d

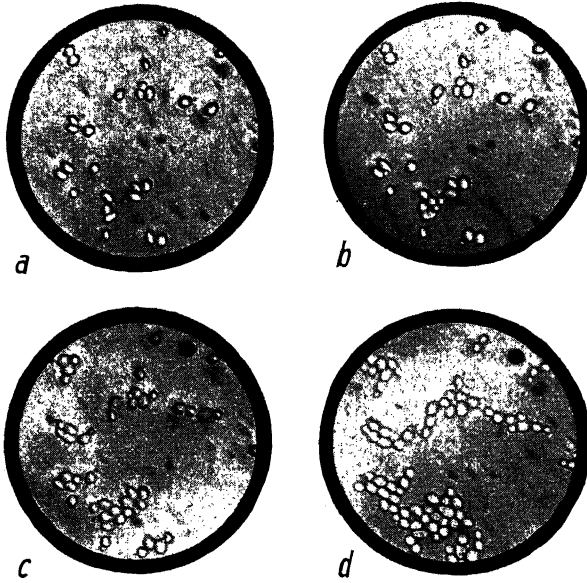



Abb. 9. Photographie lebender Hefezellen. a Ausgangsstadium, b nach 62 Minuten, c nach 120 Minuten, d nach 189 Minuten

Die Zahl der mitogenetischen Untersuchungen, die mit Hefe als Strahlenindikator ausgeführt wurden, ist außerordentlich groß. Ein sehr großer Teil der Ergebnisse wurde — dies gilt nicht nur für die mit Hefekulturen erhaltenen Ergebnisse, sondern auch für solche, die mit anderen Protisten, Zwiebelwurzeln und anderen biologischen Detektoren erzielt wurden — dabei mit Versuchsanordnungen erhalten, die eine gegenseitige chemische Beeinflussung zwischen Induktor und Detektor nicht auszuschließen imstande sind. Da nun einerseits Gurwitsch immer wieder die ausschließliche Strahlennatur des mitogenetischen Reizfaktors betont, andererseits aber die Einwirkung chemischer Faktoren auf Mitosen und Zellvermehrungen seit langem bekannt ist und von vielen Forschern auch für einige mit der mitogenetischen Forschung in engem Zusammenhang stehende Sonderfälle erneut nachgewiesen wurde, ist es klar, daß für das Problem der mitogenetischen Strahlung nur solche Versuchsergebnisse etwas auszusagen vermögen, die mit Anordnungen erhalten wurden, die nur dem Strahlenfaktor einen Zutritt zum Detektor gestatteten. Wir können uns in diesem Punkte nicht der Auffassung anschließen, wie sie z. B. von dem deutschen Zoologen Stempell vertreten wird, daß ein Ausschluß der Einwirkung chemischer Faktoren nicht immer und nicht überall nötig sei, oder daß es gar möglich wäre, nachträglich die Wirkungen der einzelnen Faktoren mit genügender Genauigkeit voneinander zu trennen.

Werden diese Gesichtspunkte bei der kritischen Durchsicht der mitogenetischen Literatur berücksichtigt, so müssen zunächst eine große Zahl von Versuchen als

ungeeignet für die Beurteilung des etwa vorhandenen Strahlenfaktors ausgeschieden werden. Aber auch abgesehen von der etwa vorliegenden Möglichkeit chemischer Beeinflussung — auf die Notwendigkeit absoluter Gleichheit aller übrigen chemischen und physikalischen Faktoren bei Detektor und Kontrolle möge hier nur hingewiesen werden, — müssen, soweit die Hefemethode in Betracht kommt, noch andere Bedenken grundsätzlicher Art erhoben werden. So ist es z. B. bei der Beimpfung eines Nährbodens außerordentlich schwer, ihn vollkommen gleichmäßig zu beimpfen. Da nun einerseits offenbar die Vermehrungsintensität der Hefezellen von den gerade herrschenden Lebensbedingungen abhängig ist, die Sprossung an dünn beimpften Stellen sich also von der an dicht besetzten unterscheiden wird und da andererseits gewöhnlich nur ganz geringfügige Zellmengen von Detektor und Kontrollkultur untersucht werden, ist die Gefahr vorhanden, daß das Zählresultat durch den zufälligen Ort der Probeentnahme maßgeblich beeinflußt wird.

Bei der überwiegenden Mehrzahl der von den verschiedenen Autoren veröffentlichten Versuchsergebnisse ist es zudem nicht möglich, die statistische Sicherheit der mitgeteilten Zahlenwerte zu beurteilen. Gewöhnlich fehlen alle Angaben über Fehlerbreiten und Fehlergrenzen der Resultate, was bei einem biologischen Versuchsobjekt ja besonders wichtig ist. In den Arbeiten, in denen diese Angaben vorhanden sind, sind jedoch Einzelresultate kaum durch den dreifachen mittleren Fehler gesichert.

Eigene Nachprüfungsversuche mit Abzählung der Sprossen, bei denen alle Fehlerquellen nach Möglichkeit vermieden wurden und bei denen nur eine Beeinflussung des Detektors durch den Strahlenfaktor möglich war, haben uns niemals eine Anregungswirkung durch eine biologische „Bestrahlung" ergeben. Auch die unmittelbare Beobachtung des Wachstums einzelner Hefezellen in der in Abbildung 9 angedeuteten Weise ergab zwischen Detektor und Kontrolle nur Wachstumsunterschiede von einer solchen Größe, wie sie normalerweise zwischen verschiedenen Kontrollkulturen stets zu finden sind. Indem wir aus den auf diesem Wege erhaltenen Wachstumskurven die Generationsdauer der Hefezellen bestimmten, das ist diejenige Zeitspanne, innerhalb welcher aus einer Zelle eine gleichgroße Tochterzelle entstanden ist, mußten wir feststellen, daß sie auch bei denkbar gleichen physikalischen und chemischen Bedingungen ganz erhebliche Schwankungen aufweist. Die notwendige Folgerung daraus ist, daß bei den großen normalen Schwankungen der Vermehrungsintensität Hefekulturen nicht ohne weiteres für solche diffizile Untersuchungen geeignet sind, wie sie bei der Erforschung der Gurwitschstrahlung vorliegen.

Auch bei den übrigen in der mitogenetischen Forschung noch angewendeten biologischen Detektoren sind mancherlei Einwände erhoben worden. Wir wollen hier nur noch die von dem französischen Forscher Magrou und seinen Mitarbeitern verwendeten Seeigeleier erwähnen. Diese Forscher glaubten zuerst bei

Bestrahlung von Seeigeleiern mit biologischen Strahlenquellen eine Induktionswirkung erhalten zu haben, die sich in einer krankhaft gehemmten Entwicklung der Eier oder, nach etwas abgeänderter Auffassung des Primärvorganges, in übermäßiger Entwicklung der Mesenchymzellen äußerte (vgl. Abb. 10). Gegen die Zuverlässigkeit dieses Detektors, dessen großer Vorzug die sofort festzustellende und nicht zu übersehende Verschiedenheit zwischen bestrahlter und unbestrahlter Kultur war, wurden sehr bald schwerwiegende Einwände erhoben. Bei einer daraufhin angestellten Nachprüfung der Ergebnisse kam auch wirklich Magrou mit seinen Mitarbeitern zu dem Ergebnis, daß die beobachtete abnormale Entwicklung der Seeigeleier nicht auf die Wirkung einer Strahlung zurückgeführt werden kann. Sie erhielten nämlich auch dann die früher der mitogenetischen Strahlung zugeschriebene Wirkung, wenn zwischen Induktor und Detektor eine strahlenundurchlässige Metallfolie gelegt wurde.

Abb. 10. Entwicklung von Seeigeleiern. (Nach Magrou aus Rahn, Invisible Radiations of organisms). I und III Kontrolle. II Exponiert vor einem Gefäß, in dem eine chemische Reaktion abläuft, IV normale Eier, befruchtet mit 45 Minuten lang exponierten Spermien

Bei der schon früher erkannten Unsicherheit der biologischen Nachweismethoden versuchte man bald, mit physikalischen oder chemischen Hilfsmitteln einen einwandfreien Existenzbeweis zu liefern. Sehr nahe lag bei einer Strahlung die Verwendung der photographischen Platte, wie dies auch oft, aber stets mit negativem Erfolg getan wurde. Die wenigen positiven Ergebnisse können wegen

der vielen offensichtlichen methodischen Fehlerquellen nicht ernstlich gewertet werden. Gurwitsch stellte durch Vergleich mit künstlichem Licht entsprechender Wellenlänge fest, daß die mitogenetische Strahlung intensitätsmäßig nur etwa $^1/_{200}$ des Schwellenwertes der von ihm verwendeten Photoplatten betrug.

Auf anderem Wege glaubte dann Stempell durch die von ihm gefundene Beeinflussung der Liesegangschen Ringfiguren durch Zwiebelsohlenbrei einen einwandfreien Nachweis der Gurwitschstrahlen gefunden zu haben. Es stellte sich jedoch bald heraus, daß flüchtige Stoffe und Gase an der Beeinflussung der Ringe zumindest maßgeblich beteiligt sind. In einer großen Anzahl von Nachprüfungen der Stempellschen Ergebnisse wurde sogar überhaupt kein Einfluß der Gurwitschstrahlung gefunden und die betreffenden Forscher kommen zu einer völligen Ablehnung des Stempellschen Detektors. Versuche, die Liesegangschen Ringe mit künstlichem Ultraviolettlicht zu beeinflussen, ergaben, daß zwar größere Intensitäten ein schärferes Hervortreten der Ringe, eine Verfeinerung und Vermehrung ihrer Zahl, sowie eine Änderung des Farbtons zur Folge haben, daß dagegen jedoch kleine Intensitäten von ultraviolettem Licht nicht die geringste Beeinflussung der Ringe erkennen lassen.

Auch auf lichtelektrischem Wege wurde vielfach versucht, die mitogenetische Strahlung zu erfassen. Bei ihrer geringen Intensität, die, wie wir oben gesehen haben, im Höchstfall zu etwa 1000 Quanten pro Quadratzentimeter und Sekunde geschätzt wird, haben die üblichen Anordnungen, in denen eine photoelektrische Zelle sonst gewöhnlich verwendet wird (Auflademethode, Entlademethode usw.), schon von vornherein keine Aussicht auf Erfolg. Positive Resultate können nur mit solchen Anordnungen erwartet werden, die eine Messung einzelner durch die auffallenden Quanten an dem lichtelektrisch wirksamen Metallbelag ausgelöster Elektronen gestatten. Mit Anordnungen, die auf dieser Grundlage beruhen, sind von verschiedenen Forschern Versuche angestellt worden. Die Tabelle ergibt einen Überblick über die bisher vorliegenden Ergebnisse. Man erkennt aus ihr, daß sich auch mit der bisher empfindlichsten physikalischen Methode eine Klärung der Verhältnisse nicht erzielen ließ.

Es erhebt sich in diesem Zusammenhang sogleich die Frage nach der Bedeutung des physikalischen Nachweises einer von Lebewesen ausgesandten Strahlung für das ursprüngliche mitogenetische Problem als solches. Selbst wenn auf physikalischem oder chemischem Wege die Strahlenaussendung erhärtet sein sollte, hätte dies für das biologische Problem, wie auch schon von Gurwitsch ausdrücklich betont wurde, nicht viel zu bedeuten. Es bliebe dann immer noch die Frage offen, ob diese Strahlung auch wirklich die Fähigkeit besitzt, mitogenetisch d. h. mitosenerzeugend bzw. in weiterem Sinne wachstumsanregend zu wirken. Aus diesem Grunde muß daher in der mitogenetischen Forschung unbedingt das Schwergewicht auf die biologischen Nachweismethoden gelegt werden. Zu fordern ist hierbei, daß streng zwischen dem Strahlenfaktor und anderen chemischen

Tabelle
(zusammengestellt von A. Hollaender und W. D. Claus)

Autor	Lichtempfindliche Oberfläche	Empfindlichkeit (1 Elektron wird ausgelöst durch etwa .. Quanten)	Wellenlänge, bei der die Empfindlichkeit festgestellt wurde in mμ	Biologische Strahlenquellen	Ergebnis
Rajewsky 1930–1931	Cd	10^2	265	Zwiebelwurzel	+
				Zwiebelbrei	+
				Karzinom	+
				Eiweiß (Hitzekoagulation, Säureeinwirkung)	+
				menschliches Blut	—?
				Muskel, gereizt	—?
				nekrotisches Muskelgewebe	—?
Schreiber und Friedrich 1930	K	10^4	266	Hefe	—
Frank und Rodionow 1932	Al; Cd	6×10^3	254	Froschmuskel	+
				Froschmuskelbrei	+
				Froschherz	+
				Chemische Reaktionen	+
Locher 1932				Zwiebelwurzel	—
				Bakterien	—
Seyfert 1932	Zn-Amalgam	5×10^2	230	Zwiebelbrei	—
				Zwiebelwurzel	—
				Hefe	—
	Al	3×10^3	230	Hühnerembryo	—
	Mg	5×10^3	230	Mäusetumor	—
Audubert und Doormaal 1933	Cu, Al	nicht konstant		Chemische Reaktionen	+
Siebert und Seffert 1933	Cd			Blut	+
				Karzinom	+
				Urin	+
				Oxydationsreaktionen	+
Gray u. Ouellet 1933	Pt	6×10^3	250	Seeigeleier	—
				Spermatozoen	—
				Hefe	—
				Oxydationsreaktionen	—
Petri 1933	Cd			keimender Weizen	+
Lorenz 1934	Cd	$1{,}4 \times 10^3$	230	Zwiebelbrei	—
				Zwiebelwurzel	—
				Mäusesarkom	—
				Mausembryo	—
				Froschmuskel	—
Barth 1934	Al, Cu			$K_2Cr_2O_7 + FeSO_4$	+
				Verdauung [+ H_2SO_4	+
Kreuchen und Bateman 1934	Cd, Al, Zn	$2 \div 4 \times 10^4$	254	Hefe	—
				Froschmuskel	—
				Blut	—
				Ei-Albumin	—
				Froschherz	—
				Zwiebelbrei	—
				Zwiebelwurzel	—
				Chemische Reaktionen	—
Barth 1936				Eiweißabbaureaktionen	+
				Glukose (Sekundärstrahlung) (primär Karzinom und Al in HCl)	+

und physikalischen Faktoren unterschieden wird. Es ist nicht angängig, Versuche zur Stützung der Gurwitschschen Theorie heranzuziehen, bei denen die experimentelle Anordnung die Einwirkung aller möglichen zum großen Teil außerdem noch unbekannten Faktoren zuläßt.

Unabhängig davon aber, ob sich die Existenz der mitogenetischen Strahlung als kurzwelliger ultravioletter Strahlen bestätigt oder nicht, muß es doch als feststehend gelten, daß zwischen den Zellen im Gewebe, zwischen den Geweben der Organe, zwischen den Individuen einer Protistenkultur enge Wechselbeziehungen bestehen, eine Tatsache, die gleichermaßen für die theoretische, wie für die praktische Biologie von sehr großer Bedeutung ist. Darüber hinaus haben die Versuche von Gurwitsch den Anstoß gegeben, chemische Reaktionen hinsichtlich einer etwa vorhandenen Strahlenaussendung näher kritisch zu betrachten. Auch die „gasförmigen Hormone", die besonders im Zusammenhang mit den Versuchen von Stempell auftauchten, gewähren einen aufschlußreichen und bedeutungsvollen Ausblick in die biologische und medizinische Forschungsrichtung der kommenden Jahre.

Die Höhenstrahlung

Von Professor Dr. W. Kolhörster

Vor nunmehr 25 Jahren wurde die Höhenstrahlung als eine neue Strahlenart entdeckt, aber erst seit 10 Jahren ist ihre Existenz widerspruchslos anerkannt worden. Sie entsteht sicher weit außerhalb unserer Erde im Kosmos, wenn man auch bisher noch nicht anzugeben vermag, wo und wodurch sie sich bildet. Wie das Licht der Sterne durchdringt sie die Atmosphäre, d. h. eine Masse von der Dicke einer Quecksilberschicht von 76 cm oder einer Wasserschicht von 10 m. Sie wird dabei um das 150fache ihrer Intensität an der Grenze der Atmosphäre geschwächt. Am Erdboden angekommen, wird sie nicht etwa wie das Licht schon von den alleroberſten Bodenschichten verschluckt, sondern sie dringt noch bis 300 m Tiefe in festes Erdreich oder bis 700 m in Wasser ein. Dieses ungeheure Durchdringungsvermögen unterscheidet sie wesentlich von allen anderen bisher bekannten Strahlen, selbst von dem durchdringendsten kurzwelligen Licht der Röntgen- und der γ-Strahlen radioaktiver Substanzen. Weil jedoch ihr Verhalten noch am ehesten mit den bekannten Eigenschaften von γ-Strahlen vergleichbar erschien, kam man zunächst mehr und mehr zu der Überzeugung, eine Wellenstrahlung vor sich zu haben, bis die Entdeckung ihrer Koinzidenzfähigkeit (s. S. 216) (1927) und anschließende Koinzidenzversuche gerade das Gegenteil, nämlich ihre korpuskulare Natur bewiesen.

Die Höhenstrahlung besteht aus elektrisch geladenen Teilchen von nahezu Lichtgeschwindigkeit. Am Erdboden treffen etwa 40 solcher Teilchen in einer Stunde oder ein einziges rund alle zwei Minuten auf ein horizontales Quadratzentimeter. Nach der Strahlenanzahl würde ihre Wirkung etwa gleichwertig der von $^1/_2$ billionstel Gramm Radium oder der eines Gramms allerschwächsten radioaktiven Erdbodens sein.

Diese so kleine Strahlenanzahl wäre wohl kaum nachweisbar, wenn die Höhenstrahlen nicht ionisierten. Das bedeutet, daß sie gleich den aus geladenen Teilchen bestehenden α- und β-Strahlen radioaktiver Substanz die elektrisch neutralen Bestandteile der Materie zerspalten, z. B. Gasmoleküle in positiv und negativ geladene Bruchstücke, Jonen genannt. Das durchstrahlte Gas erhält so eine elektrische Leitfähigkeit, an deren Stärke die Strahlung selbst gemessen werden kann.

In Luft von Atmosphärendruck entstehen durch Höhenstrahlen auf ein Zentimeter Länge des Strahlenweges etwa 100 Ionenpaare, das ist ungefähr ebenso viel wie ein β-Strahl liefert, während der viel stärker ionisierende α-Strahl rund 100000 Ionenpaare hervorruft. Die elektrische Ladung des Höhenstrahls selbst kommt also in dem Schwarm der auf seinem Wege entstehenden Ionen gar nicht mehr zur Geltung, wohl aber seine Wucht oder kinetische Energie, durch welche er Ionen bildet.

Die primären Höhenstrahlen liefern ebenso wie andere Strahlen bei ihrem Zusammentreffen mit Materie auch Sekundärstrahlen. Diese erhalten von der hohen Energie der primären Strahlen zumindest anfänglich ebenfalls beträchtliche Energiebeträge mit auf den Weg. Sekundärstrahlen können in verschiedener Weise entstehen: Schon wenn der Höhenstrahl wie ein Komet durch die Mikrosphären des planetenähnlichen Atomgebildes hindurchfegt, ohne auch nur eines seiner Bestandteile direkt zu treffen, erschüttert er das elektrische Feld des Atoms derart, daß es unter Blitzen kurzwelligen Lichts sich wieder zu ordnen versucht. Es entstehen also Photonen, d. h. γ-Strahlen bzw. Röntgenstrahlen, die ihrerseits nun wieder Elektronen oder, wie besonders bei Höhenstrahlen, Elektronenzwillinge, d. h. positiv und negativ geladene Elektronen, paarweise erzeugen. Trifft der Höhenstrahl auf feste Atombestandteile, so kann er von seiner ungeheuren Wucht je nach Art des Stoßes mehr oder weniger Energie auch direkt auf diese übertragen, welche dann ihrerseits als korpuskulare Strahlen weiterfliegen. Gerät er zufällig in den Atomkern selbst, was bei der Kleinheit des Kerns von 10^{-13} cm Durchmesser gegenüber dem des ganzen Atoms von 10^{-8} cm nur selten eintreten wird, so fliegt vielleicht das ganze Gebilde explosionsartig auseinander, wobei die Bruchstücke ebenfalls zu Strahlen werden.

Alle in dieser oder anderer Weise entstehenden Strahlen faßt man unter dem Begriff der Sekundärstrahlen zusammen. Sie wirken ähnlich wie die ursprünglich primäre Strahlung ionenbildend und erzeugen ihrerseits wiederum neue Strahlen, die man als tertiäre usw. bezeichnet. So wird die im Höhenstrahl enthaltene Energie, von Korpuskeln auf Wellen, von Wellen wieder auf Korpuskeln, und so fort übergehend zur Ionisierung aufgebraucht und schließlich in Wärme überführt.

Wenn man nun erfährt, daß ein einziger, nicht einmal besonders energiereicher Höhenstrahl eine mindestens tausendfach größere Energie als der stärkste künstlich herstellbare Strahl besitzt, so mag man sich danach ungefähr eine Vorstellung machen, wie viele Sekundärstrahlen und Ionen ein solcher Strahl hervorruft und welche Zerstörung er anzurichten vermag, ehe sein Ionisierungsvermögen allmählich erloschen und die Energie zu Wärme „abgebaut“ worden ist.

Es ist also schon recht gut, daß diese Strahlung nur in so geringer Menge vom Weltall zu uns dringt und daß unser Schutzpanzer, die Atmosphäre, sie noch um rund das 150fache schwächt. Immerhin sind wir Menschen der Höhenstrahlung

doch in hohem Grade ausgesetzt, denn rund 100 Millionen Strahlen „durchschießen" den Erwachsenen an einem einzigen Tage. Vielleicht sind es diese Strahlen, die das Leben der höheren Organismen begrenzen, sei es direkt durch Zerstörung der Zellen, sei es indirekt durch Erzeugung von Nekro- (Todes-) Hormonen.

Dagegen beklagt sich der Forscher über ihre zu geringe Anzahl, wenn er es auch anerkennen muß, daß er überhaupt so energiereiche Strahlen vom Kosmos, und dazu noch geschenkt, erhält. Denn um künstliche Höhenstrahlen herzustellen, müßte man, wie erwähnt, etwa Einrichtungen benutzen, die tausendfach höhere Spannungen liefern als die bisher stärksten Apparaturen, mit denen man Millionen (10^6) e-Volt Elektronen erzielt unter Verwendung von Spannungen von einigen Millionen Volt. Diese Spannungen erheblich weiter zu steigern, scheint vorerst nicht möglich, weil unsere Isolierstoffe versagen. Wollte man auf irgendeine andere Weise Strahlen bis zu einer Billion (10^{12}) e-Volt, wie sie in der Höhenstrahlung noch auftreten, herstellen, so würde dazu die experimentelle Beherrschung von Energieumsätzen mindestens gleicher Größe erforderlich werden, denen die Bausteine unserer Welt kaum mehr standhalten.

Mithin mag man vermuten, daß die Höhenstrahlung unter Bedingungen entsteht, bei denen Energieumsätze höchsten Ausmaßes auftreten wie vielleicht bei der „Explosion" von Gestirnen, womit wir heute das Erscheinen neuer Sterne, der Novae, erklären. Derartige Untersuchungen könnten daher schließlich zu solchen Gegenden im Kosmos führen, in denen für uns noch ganz neuartige Zustände der Materie herrschen; deren Kenntnis dürfte weitere Aufschlüsse über den Aufbau und das Leben der Fixsterne erwarten lassen. Auch zur Lösung anderer astronomischer Fragen, wie z. B. die Verteilung absorbierender Massen im Milchstraßensystem, seiner Rotation usw. wird die Höhenstrahlung vielleicht schon bald noch ein besseres Werkzeug als das Licht sein.

Für geophysikalische Forschungen, insbesondere in uns nicht erreichbaren Höhen, ist sie bereits heute von besonderer Bedeutung. Das Studium ihrer geographischen Verteilung über die Erdoberfläche bietet die Möglichkeit, das erdmagnetische Feld weit außerhalb der Erde kennenzulernen, Untersuchungen der Absorptionsvorgänge in der Atmosphäre lassen Rückschlüsse auf ihre Gestalt und die Massenverteilung in ihr zu. Im Laboratorium wird schon jetzt die hohe Energie der Strahlen zur Analyse der Atome und für Fragen der Kernphysik mit Vorteil verwendet. So hat z. B. die Höhenstrahlung zur Entdeckung des positiven Elektrons, des Positrons durch Anderson geführt. Für die Prüfung der Gesetze der Elektrodynamik im weiteren Energiebereich bietet sie bisher die einzige Möglichkeit.

Diese kurzen Andeutungen werden genügen, um die Bedeutung der Höhenstrahlen einzuschätzen, welche wie Lichtstrahlen uns Kunde zu geben vermögen vom Geschehen im Makrokosmos des Weltalls ebensowie vom Mikrokosmos seiner Bausteine, der Atome.

Meßmethoden

Handelt es sich, wie bei der Höhenstrahlung, um die Erforschung eines so neuartigen Gebietes, daß Analogieschlüsse aus bekannten Erscheinungen zu unsicher werden, so kommt den experimentellen Methoden erhöhte Bedeutung zu — besonders dann, wenn nur eine einzige, nämlich die ionisierende Wirkung der Strahlen (s. S. 210), verwendbar ist. Wir wollen uns daher zunächst mit den Meßmethoden befassen.

Elektrisch geladene Teilchen hoher Geschwindigkeit zersplittern die an sich neutralen Atome eines Gases in positiv und negativ geladene Jonenpaare; sie entstehen auf dem Wege des Strahles ziemlich nahe beieinander. Sich selbst überlassen, neutralisieren sich die Jonen infolge ihrer entgegengesetzten Ladungen und unter dem Einfluß der Diffusions- bzw. Wärmebewegung; durch diese Wiedervereinigung wird nach Aufhören der Strahlung bald die gesamte Jonisation rückgängig gemacht. Ist jedoch gleichzeitig mit der Jonisierung ein elektrostatisches Feld wirksam, so trennt dies die Jonen entsprechend ihren „Ladungsvorzeichen" so schnell voneinander, daß zur Wiedervereinigung kaum Zeit bleibt und die gesamte positive oder negative Jonenmenge durch ihre elektrische Ladung gemessen werden kann. Praktisch verfährt man folgendermaßen:

Man bringt in der Mitte eines gasdicht abgeschlossenen Gefäßes, etwa in der Form und Größe einer Konservenbüchse, ein Elektrometer an, das man ohne Öffnen der Büchse von außen aufladen und ablesen kann. Ist z. B. das Elektrometer positiv auf $+\mathrm{Va}$ Volt geladen, so herrscht im Innern zwischen Elektrometer und Wand ein elektrostatisches Feld, weil das Gefäß auf einem Tisch oder dgl. steht, also geerdet ist. Unter dem Einfluß des Feldes werden die vom Strahl erzeugten positiven Jonen vom Elektrometer zur Wand getrieben, wo sie ihre Ladung zur Erde abgeben. Die negativen Jonen wandern in entgegengesetzter Richtung zum Elektrometer, dessen positive Ladung sie auf etwa Ve Volt ausgleichen innerhalb der Zeit ta—te Sekunden. Das geladene System verliert also $\frac{\mathrm{Va}-\mathrm{Ve}}{\mathrm{ta}-\mathrm{te}}$ Volt in der Zeiteinheit. Der Voltverlust in der Zeiteinheit $\frac{\mathrm{Va}-\mathrm{Ve}}{\mathrm{ta}-\mathrm{te}}$ multipliziert mit der Kapazität des isolierten Systems C ergibt die auf das Elektrometer in der Zeiteinheit übertragene Elektrizitätsmenge oder die Stromstärke $\frac{C}{300}\cdot\frac{\mathrm{Va}-\mathrm{Ve}}{\mathrm{ta}-\mathrm{te}}$, wobei der Faktor 300 wegen der Messung der Spannung in Volt anzuwenden ist. Da jedes Jon die gleiche kleine Ladung, nämlich $\pm e = 4{,}77\cdot 10^{-10}$ elektrostatische Einheiten (die Elementarladung) trägt, so erhält man die Anzahl der erzeugten Jonen durch Division durch diese Elementarladung e zu $\frac{C}{300\,e}\cdot\frac{\mathrm{Va}-\mathrm{Ve}}{\mathrm{ta}-\mathrm{te}}$ und beim ionisierten Volumen von L cm³ Luft die Jonisierungsstärke J in Jonenpaaren je Kubikzentimeter und Sekunde zu $J = \frac{C}{300\cdot eL}\cdot\frac{\mathrm{Va}-\mathrm{Ve}}{\mathrm{ta}-\mathrm{te}}\ \mathrm{cm}^{-2}\,\mathrm{sec}^{-1}$.

Nur wenn die elektrische Spannung auf dem Elektrometer oder die Feldstärke zwischen Elektrometer und Wand so groß ist, daß die Ionen sofort getrennt werden, tritt kein Anwachsen der Ionisierungsstärke mit Erhöhung der Spannung am Elektrometer mehr ein; man spricht dann von Sättigungsstrom. Diese Bedingung wird bei Messung der Höhenstrahlen so sorgfältig wie möglich eingehalten, um nicht durch Untersättigung die geringe vorhandene Wirkung noch unnötig zu schwächen.

Die soebenbeschriebene Art der Ionisationsmessung wird als Entlademethode bezeichnet, während bei der prinzipiell gleichen Auflademethode die Gefäßwandung isoliert an Spannung liegt, so daß dann die Aufladung des Elektrometers zur Beobachtung kommt.

Jede der beiden Methoden hat ihre besondere Bedeutung und ihre Vor- und Nachteile bei der Verwendung unter den verschiedenen Bedingungen. Die Entlademethode erfordert Elektrometer geringer Empfindlichkeit aber kleinster Kapazität, im ganzen also ziemlich widerstandsfähige Instrumente, die den Anforderungen an Transportfähigkeit bei Expeditionen wie Hochgebirgsmessungen, Luftfahrten und dgl. gewachsen und vor allem äußerst einfach konstruiert sind. Bei der Auflademethode müssen wegen der unumgänglich höheren Kapazität sehr empfindliche Elektrometer benutzt werden. Infolgedessen machen sich dann alle möglichen Störungsquellen, z. B. Temperatur- und Isolatoreinflüsse viel stärker bemerkbar als bei den unempfindlichen Elektrometern. Um diese Fehlerquellen möglichst auszuschließen ist es in diesem Falle am günstigsten, das Elektrometer nur als Nullinstrument zu verwenden. Dazu gleicht man den Ionisationsstrom durch einen künstlich erzeugten entgegengesetzten Strom aus, der allein gemessen zu werden braucht. Derartige Anordnungen sind recht kompliziert, schwer transportfähig und nur unter Laboratoriums- oder ähnlich günstigen Bedingungen bequem verwendbar. Man kann aber mit der Auflademethode rund eine Zehnerpotenz genauer messen.

Bis zum Jahre 1927 kannte man nur das hier skizzierte Ionisationsverfahren in seinen beiden Ausführungsarten. Es wurde seinerzeit als Meßmethode radioaktiver Substanzen auf die Höhenstrahlen übernommen, ihren besonderen Bedingungen angepaßt und weiter vervollkommnet. Zur besseren Ausnutzung der Ionisierung der Höhenstrahlen verwendete man statt Luft von normalem Druck von 760 mm Quecksilbersäule bei der Temperatur 0° Celsius nunmehr höhere Gasdrucke bis 200 Atmosphären und schwere Gase, besonders Argon zum Füllen der Ionisationsgefäße. Bei diesen hohen Drucken ist jedoch Sättigung kaum zu erreichen, so daß man vielfach wieder auf Drucke von 10—15 Atmosphären zurückgeht und für Absolutbestimmungen noch immer Luft von Normaldruck benutzt.

Die mit Ionisationsapparaturen erreichte Meßgenauigkeit ist außerordentlich hoch. Schon mit kleinen transportablen Apparaten kann man auf einige Hundertstel I (Ionenpaare je Kubikzentimeter und Sekunde s. S. 213), mit den größeren

auf einige Tausendstel J messen, d. h. man mißt elektrische Ströme bis etwa 10^{-17} Ampere. Zum Vergleich ist der Strom von 0,2 Ampere einer normalen 40 Watt Glühlampe etwa 10^{16}, d. h. 10billiardenmal so groß!

Diese hohe Meßgenauigkeit wird allerdings nur erreicht, indem man den Faktor Zeit ausgiebig zu Hilfe nimmt, d. h. über lange Zeiten mißt. Das stellt große Anforderungen an die Konstanz der Apparaturen, besonders wenn es sich dabei um so winzige Ströme handelt.

Die Meßbedingungen sind hier etwas näher ausgeführt worden, um die eigenartige Entwicklung der Höhenstrahlenforschung, besonders in der ersten Zeit, verständlicher zu machen. Mußten doch die damaligen Beobachtungen, oft unter den ungünstigsten Bedingungen, z. B. im schwankenden Ballonkorb bei Temperaturen bis zu —45° oder im Hochgebirge bei Sturm, Wetter und grimmiger Kälte ausgeführt werden. Das machte manchmal wahre Kunststücke von Meßakrobatik erforderlich, und man versteht daher, daß besonders während der ersten Zeit der Höhenstrahlenforschung erhebliche Widersprüche in den Meßergebnissen nicht selten waren. Ist doch die verhältnismäßig späte allgemeine Anerkennung der Existenz der Höhenstrahlung fast ausschließlich auf ungenügende Meßtechnik zurückzuführen.

Eine zweite Meßmethode für Höhenstrahlung beruht darauf, daß die von den Strahlen erzeugten Jonen durch hohe elektrische Spannungen in engen Jonisationskammern so stark beschleunigt werden können, daß die entstehenden Jonen selbst wieder zu Strahlen werden, welche nunmehr ihrerseits zu ionisieren vermögen. Der Vorgang, für den das starke elektrische Feld die erforderliche zusätzliche Energie liefert, wiederholt sich bei jedem neu erzeugten Jon, also sehr viele Male, es entsteht eine vom ursprünglichen Strahl nur ausgelöste Jonenlawine, d. h. eine millionenfache Verstärkung wird so ermöglicht. Dies von Rutherford und Geiger (1908) zuerst auf radioaktive α-Teilchen, von Geiger und Müller (1927) auf Höhenstrahlen angewendete Verfahren der von Townsend sowie J. Stark (1901) entdeckten Stoßionisation ist so empfindlich, daß man mit dem Zählrohr jeden einzelnen Höhenstrahl nachweisen kann, selbst wenn er das Rohr so ungünstig durchsetzt, daß nur ein einziges Jonenpaar anfänglich ausgelöst wird.

Die praktische Ausführung des Zählrohres sieht ein Metallrohr vor, in dessen Achse ein sehr feiner Draht zwischen isolierenden Stopfen ausgespannt ist. Die Außenwand des Rohres liegt an einer Spannung von einigen Tausend Volt, der Zähldraht ist mit einem Anzeigeinstrument, z. B. Elektrometer, Lautsprecher oder dgl. über einen hohen Widerstand geerdet oder mit dem Gitter des Eingangsrohres eines Radioverstärkers verbunden. Je nach Bedarf lassen sich dann durch die Verstärkung nahezu beliebig hohe Leistungen erzielen, z. B. mechanische Zähl- und Druckwerke betreiben, gespannte Federn, Lichtblitze, Nebelkammeraufnahmen auslösen und dgl.

Bei Verwendung mehrerer derartiger Zählrohre fand Kolhörster unter den einzelnen Stößen jedes der Rohre auch solche, welche gleichzeitig in zwei oder

mehreren Rohren auftraten und deutete diese Koinzidenzen als hervorgerufen von ein und demselben Höhenstrahl, der geradlinig so lief, daß die ansprechenden Rohre durchsetzt worden sind. Mit derartigen Anordnungen kann also die Richtung koinzidierender Höhenstrahlen festgelegt bzw. an genau definierten, beliebig engen Strahlenbündeln gearbeitet werden. Andererseits bleiben auf diese Weise Strahlen aus nicht gewünschten Richtungen allein durch die geometrische Anordnung der Rohre völlig unwirksam. Dadurch ist es also möglich, die durchdringendsten aller bekannten Strahlen, welche noch nicht einmal mit 100 m dicken Stahlplatten völlig aufzuhalten sind, einfach durch die Geometrie der Anordnung auszuschalten.

Die Koinzidenzfähigkeit der Höhenstrahlen ist deshalb für die neuere Entwicklung der Forschung von allergrößter Bedeutung geworden, weil sie die Anwendung der Koinzidenzmethoden in allen erdenkbaren Verbindungen gestattet. Untersuchungen dieser Art mit zwei Zählrohren haben sogleich zu dem fundamentalen Ergebnis der korpuskularen Natur der Höhenstrahlen durch Bothe und Kolhörster geführt. Sie sind auch für die Ermittelung der Richtungsverteilung, der Absorption, des Ionisationsvermögens und vieler anderer Eigenschaften der Höhenstrahlen nahezu unersetzlich, zumal die experimentellen Bedingungen bei Verwendung von Koinzidenzen recht günstig liegen. So kann man z. B. radioaktive Störstrahlen durch Koinzidenzanordnungen prinzipiell ausschließen, was für die Untersuchung der letzten Reste von Höhenstrahlen hinter dicken Absorbern und damit auch für die Untersuchung von Reststrahlen besonders vorteilhaft ist. Daneben gestattet die Röhrenverstärkung in sehr einfacher Weise Einzelstöße von Koinzidenzen schon durch die Art der Schaltung zu trennen und dabei die zeitliche Übereinstimmung der Koinzidenzen, d. h. des Auflösungsvermögens der Anordnung, auf weniger als $^1/_{1000}$ Sekunde zu begrenzen.

Eine dritte Methode zur Erforschung der Höhenstrahlen fand Skobelzyn zufällig, als er die Wilsonsche Nebelkammer zur Untersuchung radioaktiver β-Strahlen benutzte. Eine solche Nebelkammer ist ein flaches zylindrisches Gefäß mit einem Glasdeckel, durch welchen man in das Innere der Kammer sehen, also auch photographieren kann. Die Kammer wird mit gereinigter, aber feuchter Luft oder einem anderen Gase (z. B. Argon) mit kondensierbarem Dampf (z. B. Alkohol) gefüllt. Bei plötzlicher Ausdehnung und dadurch hervorgerufener Abkühlung des Füllgases richtet man es so ein, daß Nebelbildung durch Kondensation nur an den Ionen eintritt, welche bei Durchstrahlung der Kammer gerade in diesem Augenblick erzeugt wurden. Durch die Anlagerung der Wassertröpfchen werden die Ionen erstens so beschwert, daß sie eine kurze Zeit am Orte ihrer Entstehung liegen bleiben und zweitens so vergrößert, daß sie bei greller Beleuchtung als feine Nebeltröpfchen den Weg des Strahls sicht- und photographierbar machen.

Da alle ionisierenden Strahlen derartige Bahnen erzeugen, muß man nach Möglichkeiten suchen, die verschiedenartigen Teilchen voneinander unterscheiden

zu können. Schon oft genügt der bloße Anblick, um aus der Form und Dichte der Nebelstreifen auf die Art der erzeugenden Strahlen zu schließen. Z. B. geben stark ionisierende Strahlen, wie Protonen und α-Teilchen sehr dichte gradlinige und kurze, β-Teilchen feinere, oft vielfach gekrümmte Nebelstreifen, während γ-Strahlen allein unsichtbar bleiben, weil sie nicht direkt zu ionisieren vermögen. Da letztere aber ionisierende Sekundärstrahlen liefern, so findet man bei diesen kürzere, von der unsichtbaren Bahn ausgehende Nebelstrahlen, deren Ausgangspunkte die Richtung des γ-Strahls ungefähr erkennen lassen.

Um die Strahlen, welche die Nebelspuren erzeugen, genauer zu untersuchen, bringt man die Kammer zwischen die Pole eines Magneten so, daß die magnetischen Kraftlinien senkrecht zur Strahlenrichtung wirken. Der Strahl als schnellbewegtes, geladenes Teilchen stellt einen elektrischen Stromleiter dar. Infolgedessen wird das Teilchen abgelenkt, sein Weg in eine Kreisbahn gekrümmt. Die Ablenkung von Elektronen erfolgt im Uhrzeigersinn, wenn man in Richtung der Kraftlinien auf die Kreisbahn blickt dagegen umgekehrt bei positiv geladenen Teilchen wie Positronen, Protonen oder α-Strahlen. Man kann, sofern Feldstärke des Magneten und Masse des Teilchens bekannt sind, durch Ausmessen der Bahnkrümmung seine Geschwindigkeit und Wucht (kinetische Energie) zahlenmäßig genau bestimmen und auf diese Weise Höhenstrahlen von den energieärmeren radioaktiven Strahlen sicher unterscheiden. Doch braucht man bei der großen Energie der Höhenstrahlen sehr starke und weit ausgedehnte Magnetfelder, um eine noch gerade meßbare Krümmung des Strahles zu erkennen. Die stärksten bisher erzielten Magnetfelder von rund 20000 Gauß auf ein Quadratzentimeter über Flächen von rund 400 cm², die z. B. Anderson, Kunze u. a. benutzten, erfordern zur Erregung des Elektromagneten Gleichstrom von solcher Stärke, daß ihn das Elektrizitätswerk einer mittleren Stadt noch gerade zu liefern imstande ist. Um die Spulen nicht durch die auftretende Erwärmung zu zerstören, dürfen sie nur ganz kurzzeitig, bis zu einer Minute etwa, unter Strom gehalten werden. Dabei treten in den Drahtwindungen der Spulen Drucke bis zu 100 Atmosphären auf. Trotz dieses Aufwandes konnten bisher nur Höhenstrahlen bis rund $5 \cdot 10^9$ e-Volt gemessen werden, also nur weiche Strahlen, welche gerade noch die ganze Erdatmosphäre zu durchsetzen vermögen, während man aus Absorptionserscheinungen und aus der Ablenkung durch den Erdmagneten schließen muß, daß die meisten Höhenstrahlen zehn- und mehrfach höhere Energien aufweisen.

Als nun Skobelzyn seinerzeit Untersuchungen an radioaktiven β-Strahlen mit Nebelkammer unter Verwendung stärkerer magnetischer Felder ausführte, fand er unter Hunderten von Aufnahmen auch einige mit Strahlenspuren, welche nicht den radioaktiven β-Strahlen angehören konnten, weil sie trotz seines Magnetfeldes von 1500 Gauß auf einen Quadratzentimeter geradlinig, also unabgelenkt blieben. Ihre Energie mußte demnach sehr viel größer sein als die der zu Kreis-

bahnen gekrümmter radioaktiver β-Strahlen; auch ihr weiteres Verhalten ähnelte dem, was man bei Höhenstrahlen erwarten konnte, so daß Skobelzyn mit verbesserten Versuchsbedingungen seine Annahme bestätigt fand, daß die ungekrümmten Bahnen von Höhenstrahlen herrührten, Höhenstrahlen also mit der Nebelkammer nachzuweisen sind.

Anfänglich war dies wegen der geringen Ausbeute von höchstens einigen Prozenten der gesamten Aufnahmen ein sehr mühsames Verfahren. Die Zeit nämlich, während der die Nebelkammer wirksam ist, beträgt nur hundertstel Sekunden, so daß selbst bei großen Kammern nur selten die Kammer gerade dann arbeitet, wenn ein Höhenstrahl sie durchsetzt. Die Ausbeute würde sich wesentlich steigern lassen, wenn man den Höhenstrahl dazu bringen könnte, sich selbst zu photographieren. Dies erreichten z. B. Blackett und Occhialini, indem sie über und unter der Kammer koinzidierende Zählrohre so anbrachten, daß der Höhenstrahl durch die Kammer gelaufen sein muß, wenn die Zählrohre eine Koinzidenz anzeigen. Diese Koinzidenz löst dann sogleich automatisch die Luftexpansion in der Kammer, die Belichtung der Nebelbahn und die Photoaufnahme aus. Die Ausbeute beträgt etwa 80—90 % bei koinzidenzgesteuerten Kammern, statt der rund 5 % bei zufallsmäßig betriebenen. Daß die Ausbeute bei ersteren nicht hundertprozentig erfolgt, liegt daran, daß Zufallskoinzidenzen durch die Einzelstöße in den Rohren auch falschen Alarm schlagen können.

Eine vierte Methode zur Untersuchung von Höhenstrahlen bietet der Breiteneffekt (s. S. 233). Mißt man nämlich die Stärke der Höhenstrahlen an verschiedenen Orten der Erde in derselben Seehöhe oder in gleicher Tiefe unter dem Gipfel der Atmosphäre, d. h. also bei gleichem Luftdruck, so findet man nach den Polen zu höhere Strahlungswerte als in Äquatornähe. Diese Verteilung über die verschiedenen Breiten läßt sich durch die Wirkung des erdmagnetischen Feldes ganz ähnlich wie bei Polarlichtern, also auch durch magnetische Ablenkung der geladenen Teilchen, erklären. Da jedoch das erdmagnetische Feld in Bodennähe nur 0,2 Gauß cm^{-2} beträgt und damit nur etwa $^1/_{100000}$ der Stärke der bei Ablenkungsversuchen künstlich erzeugten Magnetfelder besitzt, so muß es durch seine Ausdehnung ersetzen, was ihm an Intensität fehlt. Es muß also auf Zehntausende von Kilometern von der Erdoberfläche hinweg wirken können, um die beobachteten Ablenkungen hervorzubringen. Das bedeutet, daß es die im freien Weltenraum auftretenden primären Höhenstrahlen ablenkt, die also noch nicht durch Sekundärerscheinungen beim Durchsetzen der Atmosphäre verändert worden sind. Das Studium des Breiteneffektes bietet mithin die einzigartige Möglichkeit an reiner Höhenstrahlung zu beobachten, ein Vorzug, der nicht einmal bei Stratosphärenaufstiegen in diesem Maße erreicht wird.

Schließlich seien noch als weitere auf Ionisationswirkung beruhende Meßmethoden erwähnt die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit hochisolierender Kohlenwasserstoffe, die bisher erst einmal zur Untersuchung der sogenannten Stöße

der Höhenstrahlung benutzt worden ist, und die seit längerem von Kolhörster vorgeschlagene Exposition photographischer Filme. Versuche dieser Art anläßlich der letzten amerikanischen Stratosphärenflüge ergaben Bahnspuren von Höhenstrahlenteilchen, die den in Nebelkammern beobachteten Bahnen entsprechen, natürlich aber in dem dichteren Material kürzer verlaufen.

Die gebräuchlichsten Meßanordnungen, Ionisationskammer, Zählrohr und Nebelkammer gestatten also, die Intensität der Höhenstrahlen an ihrer Ionisationswirkung zu messen. Sie zeigen übereinstimmend nur ionisierende Strahlen an, unterscheiden sich aber in der Art, wie sie die Ionisationsfähigkeit der einzelnen im Höhenstrahlengemisch enthaltenen Strahlen verschiedenster Energie ausnutzen. Im allgemeinen bevorzugen Ionisationskammer, Nebelkammer und Zählrohr die weicheren Strahlen, koinzidierende Zählrohre die härteren, d. h. die primären. Mit verschiedenen Meßinstrumenten gewonnene Ergebnisse sind daher nicht ohne weiteres zu vergleichen. Vor allem unterscheiden sich Ionisationskammern und Zählrohre dadurch, daß erstere richtungsunempfindlich sind, letztere die Zählrohreffekte zeigen, d. h. je nach der Lage der Zählrohre zu dem einfallenden Strahlenbündel verschiedene, aber aufeinander reduzierbare Ergebnisse liefern.

Geschichtlicher Überblick

Die geschichtliche Entwicklung der Höhenstrahlenforschung läßt sich durch die Bezeichnungen: natürliche Zerstreuung — durchdringende Strahlung — Höhenstrahlung — und, wenn man will, Ultragamma-, Ultrabetha-, Ultra-Strahlung charakterisieren. Doch wollen wir für die kosmische Strahlung an der deutschen Bezeichnung festhalten.

Natürliche Zerstreuung nannte man die seit Coulomb 1785 bekannte Erscheinung, daß ein Elektrometer, aufgeladen und sich selbst überlassen, zum größten Teil seine Ladung allmählich in die umgebende Luft zerstreut und nur ganz wenig Elektrizität über den Isolator verliert. Die Erklärung durch elektrisch geladene Teilchen der Luft, welche die Ladung des Elektrometers langsam ausgleichen, blieb nahezu ein Jahrhundert lang unverständlich. Sie wurde erst 1887 durch Linß gegeben, die Natur der Teilchen als Luftionen aber erst seit etwa 1900, besonders durch Untersuchung von Elster und Geitel erkannt. Elster und Geitel, C. T. R. Wilson und andere Forscher konnten weiterhin zeigen, daß diese natürliche Ionisation der Außenluft von den Strahlen der überall im Erdboden und in der Luft vorhandenen, jedoch nur in ganz geringen Mengen vorkommenden radioaktiven Substanzen hervorgerufen wird. Dabei sind ihre durchdringenden β- und γ-Strahlen, die aus den obersten Bodenschichten auszutreten vermögen, direkt wirksam. Dagegen gelangen die bei den radioaktiven Umwandlungen entstehenden aktiven Gase, die Radium-, Thorium- und Aktinium-Emana-

tionen, aus den Poren des Erdbodens unter dem Einfluß der Bodenatmung und des Windes erst in die Atmosphäre und strahlen von hier aus zusammen mit ihren aktiven Niederschlägen. Die Außenluft wird also von der Luftstrahlung und von der Erdstrahlung, d. h. also den radioaktiven Substanzen der Luft und des Erdbodens ionisiert. Sie besitzt dadurch eine dauernde elektrische Leitfähigkeit.

Elster und Geitel sowie C. T. R. Wilson konnten ferner zeigen, daß auch eine im gasdichten Behälter abgeschlossene Luftmenge eine dauernde natürliche Zerstreuung aufweist, selbst wenn die Fülluft von jeder radioaktiven Substanz vorher sorgfältig befreit worden ist. Es bestand daher die Möglichkeit, daß neben Strahlen von radioaktiven Verunreinigungen der Gefäßwände, der Reststrahlung der Instrumente, auch noch von außen durch die Wandungen in das Innere der Gefäße eindringende Strahlen zu dieser dauernden Ionisation in geschlossenen Gefäßen beitragen.

Solche durchdringenden Strahlen wurden sehr bald von Rutherford und Cooke sowie gleichzeitig von Mc Lennan und Burton nachgewiesen (1902). Indem sie die Gefäßwände mit strahlungsfreiem Wasser- bzw. Bleipanzern abschirmten, konnten sie die dadurch hervorgerufene Abnahme der Ionisation feststellen, also zeigen, daß nunmehr eine die Gefäßwände durchdringende Strahlung ausgeschaltet war. Die Strahlung wurde durch die Panzer ebenso wie Radium-γ-Strahlung geschwächt und schien fast gleichmäßig aus allen Richtungen zu kommen. Die endgültige Entscheidung über ihre Herkunft, vom Erdboden oder von der Luft bzw. über den Anteil der Erd- und Luftstrahlung, wurde erst später durch eingehende experimentelle Arbeiten Wulfs erbracht. Etwa 1909 konnte Wulf nachweisen, daß in Bodennähe die Erdstrahlung bei weitem die Luftstrahlung überwiegt. Somit waren für die natürliche Zerstreuung in geschlossenen Gefäßen Erd- und Luftstrahlung als durchdringende Strahlung erkannt; ihre quantitative Wirkung blieb jedoch noch ungeklärt.

Um aus dem Bereich der Erdstrahlung zu kommen, hatten bereits Mc Lennan und Mitarbeiter sowie andere Forscher Messungen auf Türmen ohne besonders auffällige neue Ergebnisse ausgeführt. Auch Bergwitz konnte 1910 auf der ersten, zu solchen Untersuchungen unternommenen Freiballonfahrt nur die erwartete regelmäßige Abnahme der durchdringenden Strahlung bis zu Höhen von 1200 m entsprechend Radium-γ-Strahlen erhalten. Indessen fand Wulf bei seinen Messungen auf dem 300 m hohen Eiffelturm im gleichen Jahre, daß „entweder Luft die Radium-γ-Strahlen des Erdbodens geringer als bis dahin angenommen absorbierte, oder daß mit einer neuen noch unbekannten Zusatzstrahlung in solchen Höhen zu rechnen sei“. Gockel bestätigte 1910 auf seiner ersten Freiballonfahrt nunmehr bis rund 4000 m Wulfs Befund, daß „die Verminderung der durchdringenden Strahlung in der freien Atmosphäre lange nicht in dem Maße eintritt, wie man es erwarten könnte, wenn die Strahlung in der Hauptsache vom

Boden ausgeht". Wegen Mißgeschick und nicht einwandfreier Apparatur wiederholte Gockel die Versuche auf zwei weiteren Fahrten bis rund 3000 m mit dem inzwischen von Wulf konstruierten Strahlungsapparat. „Die Abnahme der Strahlung ergab sich noch unbedeutender als früher gefunden und, wenn man die Änderung der Luftdichte in den Instrumenten berücksichtigt, so würde sogar eine schwache Zunahme der Strahlung mit der Höhe stattfinden," wie Gockel ausdrücklich betonte. „Die erhaltenen Resultate würden in Übereinstimmung mit dem stehen, was auch Paccini aus seinen gleichzeitigen Beobachtungen über Land und über Meer und Mache aus denen in Innsbruck folgert, daß nämlich ein nicht unbeträchtlicher Teil der durchdringenden Strahlung unabhängig ist von der direkten Wirkung der in den obersten Erdschichten enthaltenen aktiven Substanz." Heß (1911—1913) bestätigte als Ergebnis seiner ersten Fahrten bis etwa 2000 m die gute Übereinstimmung zwischen seinen und Gockels Ergebnissen, „so daß man daran denken müßte, daß außer den radioaktiven Substanzen der Erde noch andere Ionisatoren mit durchdringender Strahlung in der Luft wirksam sind und daß deren Wirksamkeit mit der Höhe wächst." Als Heß schließlich bei 4 und 5 km Höhe eine stärkere Strahlungszunahme fand, welche der inzwischen von Gockel-Kleinschmidt bei Fesselballonaufstiegen bei 3000 m gefundenen entsprach, „schienen die Ergebnisse am ehesten noch durch die Annahme erklärt werden zu können, daß eine Strahlung von sehr hoher Durchdringungskraft von oben in unsere Atmosphäre eindringt und noch in den untersten Schichten einen Teil der in geschlossenen Gefäßen erzeugten Ionisation erzeugt."

Heß benutzte auf seinen Fahrten zwei Wulfsche Strahlungsapparate (teilweise noch einen dünnwandigen dritten), gegen deren konstruktive Einzelheiten sich die Kritik wendete. Denn diese Apparate erwiesen sich den bei Ballon- und besonders Hochfahrten auftretenden starken Druck- und Temperaturschwankungen nicht gewachsen, wie Gockel später zeigen konnte. Ganz abgesehen von der experimentellen Unsicherheit blieb auch noch die naheliegende Möglichkeit bestehen, die zwischen 3 und 5000 m nur durch einige Werte belegte Ionisationszunahme durch γ-Strahlen irgendwelcher radioaktiver Substanzen der darüberliegenden Atmosphärenschichten zu erklären, zumal Heß aus der Übereinstimmung der Tag- und Nachtwerte in niederen Höhen folgern konnte, daß die Sonne nicht als Strahlungsquelle in Betracht käme. Dem allen gegenüber war indessen eine gewisse Übereinstimmung als positives Ergebnis zu werten. Wollte man jedoch die Existenz und besonders den außerirdischen Ursprung der Strahlung zweifelsfrei nachweisen, so mußte die Messung bis in die größten erreichbaren Höhen mit einwandfreier Apparatur durchgeführt und aus der so gewonnenen Höhenverteilung, also an den Strahlen selbst, gezeigt werden, daß sie die gesamte Atmosphäre zu durchsetzen vermögen. Dazu war eine mindestens zehnfache größere Durchdringungskraft als die radioaktiver γ-Strahlen von der neuen Strahlung zu verlangen.

Diesen Nachweis erbrachte Kolhörster mit den von ihm hierzu besonders konstruierten Strahlungsapparaten auf Hochfahrten in den Sommermonaten 1913 und 1914. Durch mehr als 1000 Einzelwerte, die trotz der verschiedenen Fahrten übereinstimmende, von Druck und Temperatur unabhängige Werte lieferten, konnte er die Existenz der neuen Strahlung und ihr Verhalten mit der Höhe bis 9400 m zweifelsfrei nachweisen. Er erhielt z. B. in der größten Höhe 85 I oder rund den 50fachen Betrag der Bodenwerte und für die verschiedenen Höhen keine größeren Abweichungen der Apparate untereinander als ± 2 %.

Dies Material erlaubte nunmehr die numerische Bestimmung des Absorptionskoeffizienten, den Kolhörster noch dadurch verifizierte, daß er aus der Höhenverteilung die Strahlungsstärke am Erdboden berechnete und diesen Wert dann durch Wasserversenkmessungen experimentell bestätigte. So ergab sich einwandfrei, daß die beobachtete Höhenverteilung von einer neuartigen Strahlung herrührt, die keinesfalls mit den bekannten radioaktiven Strahlen identisch ist, daß sie die gesamte Atmosphäre durchsetzt und sogar noch in die Erdkruste eindringt. Wegen ihrer hohen Durchdringungskraft schrieb Kolhörster ihr kosmischen Ursprung zu und nannte sie Höhenstrahlung nach der einzigen von ihr mit Sicherheit bekannten Eigenschaft.

Während des Krieges bestätigte zunächst Gockel durch weitere Messungen im Berner Oberland die Existenz der Strahlung und durch Fesselballonaufstiege, die Kleinschmidt in Friedrichshafen ausführte, weitere Angaben Kolhörsters über die Höhenverteilung. Ferner verfolgten Heß und Kofler auf dem rund 2000 m hohen Obir und Kolhörster in Waniköi (bei Konstantinopel) das Verhalten der Strahlenstärke in Abhängigkeit von den meteorologischen Elementen. In der Nachkriegszeit untersuchten bereits Kolhörster und Kolhörster und von Salis am Jungfraujoch Absorption, Richtungsverteilung und Periodizitäten der Strahlung, während Millikan und Mitarbeiter, Swann, Marsden, Hoffmann, Behounek die Existenz der Strahlung auf Grund eigener Messungen noch verneinten. Erst um die Jahreswende 1925/26 gelang es Millikan, selber die Höhenstrahlung zu bestätigen. Doch nahm er nunmehr die Entdeckung der Strahlen gegenüber Heß und Kolhörster für sich in Anspruch, auch selbst dann noch, als seine Behauptungen von einer Reihe europäischer Forscher, schließlich in gemeinsamer Erklärung, als unberechtigt abgewiesen worden waren. Nunmehr verstummten auch sehr bald die von anderen Seiten erhobenen Einsprüche gegen die Existenz der Höhenstrahlung.

Weitere Untersuchungen von Millikan und Mitarbeitern, Steinke, Büttner u. a. vervollständigten durch Messungen im Hochgebirge und auf Luftfahrten, sowie durch Versenkmessungen in immer größeren Wassertiefen die Kenntnis der Höhen- und Tiefenverteilung der Strahlung. Hoffmann entdeckte im Verlauf seiner Untersuchungen die Übergangserscheinungen und Clay fand, unter Berufung auf frühere Messungen von Kolhörster in Konstantinopel, die ersten

Andeutungen des sogenannten Breiteneffekts (s. S. 233). Dieser wurde im weiteren Verlauf von Clay, Compton, Millikan und ihren Mitarbeitern weitgehendst erforscht. Zunächst hatte auch in diesem Falle wieder R. A. Millikan auf Grund früherer eigener Messungen noch jahrelang die Existenz des Breiteneffekts verneint.

Für genauere Intensitätsmessungen, wie sie nunmehr durch Laboratoriumsinstrumente von Hoffmann u. a. ausgeführt wurden, war die Entdeckung des sogenannten Barometereffekts durch Myssowsky und Tuwim von Wichtigkeit, die R. A. Millikan ebenfalls unberechtigt für sich in Anspruch nahm.

Mehr und mehr wurde inzwischen, besonders unter dem Einfluß von R. A. Millikan die Theorie des Compton-Effekts auf Höhenstrahlen anzuwenden versucht, so daß die Natur der Strahlung als Quanten- oder Wellenstrahlung immer besser begründet erschien. Infolgedessen glaubte Heß, statt der bisher im deutschen Sprachgebiet eingeführten Bezeichnung „Höhenstrahlen" nunmehr den Namen „Ultragamma-Strahlung" vorschlagen zu sollen, zumal er leichter in Fremdsprachen übersetzbar wäre. Abgesehen davon, daß sich inzwischen im Englischen und Französischen die Bezeichnung „Cosmic Rays" bzw. „Radiation Cosmique" bereits eingeführt hatte, wurde gerade in diesem Zeitpunkt der korpuskulare Charakter der Strahlung entdeckt, so daß weitere Umbenennungen wie Ultrabetha-, schließlich Ultra-Strahlung sich als notwendig erwiesen.

Seit 1927 wurden zwei neue Meßinstrumente in die Höhenstrahlenforschung eingeführt, das Zählrohr durch Geiger und Müller und die Nebelkammer durch Skobelzyn. Nichts zeigt klarer die Bedeutung experimenteller Methoden für ein neues Forschungsgebiet als daß nunmehr sofort ein weiterer und der seit ihrer Entdeckung wichtigste Abschnitt der Höhenstrahlenforschung begann. Gegenüber der Ionisationskammer mit ihren über ausgedehnte Strahlenbündel summierenden Ergebnissen lieferten diese Instrumente nunmehr Angaben sogar über einzelne diskrete Strahlen. Mit Zählrohren konnte auch sogleich die für die weitere Forschung grundlegende Eigenschaft der Koinzidenzfähigkeit der Höhenstrahlen (Kolhörster 1927) gefunden werden, welche seitdem die Anwendung von Koinzidenzmethoden im weitesten Umfange ermöglichen. Schon die ersten derartigen Versuche über die Absorption koinzidierender Höhenstrahlen von Bothe und Kolhörster erwiesen ihre korpuskulare Natur, zeigten, daß die geladenen Teilchen durch Ablenkung im erdmagnetischen Felde den Breiteneffekt (s. S. 233) liefern und brachten damit den bisher fehlenden Nachweis, daß Höhenstrahlen schon weit außerhalb der Erdatmosphäre entstehen müssen, also wirklich kosmischen und nicht irdischen Ursprungs sind.

Ohne auf Einzelheiten der weiteren Entwicklung seit 1928 einzugehen, läßt sich diese kurz dahin zusammenfassen, daß durch die Verwendung koinzidierender Höhenstrahlen allgemeine Kombinationen der Ionisations-, Zählrohr- und Nebelkammerversuche durchführbar wurden. Seitdem hat ein ständig gesteigertes

Arbeitstempo auf diesem Gebiet eingesetzt, so daß schon in verhältnismäßig kurzer Zeit ein mindestens in großen Zügen zutreffendes Bild dieser merkwürdigen Strahlen und ihres Verhaltens gewonnen worden ist. Sehr viel haben auch dazu beigetragen die Stratosphärenaufstiege Piccards, der Russen und Amerikaner sowie die Registrieraufstiege Regeners. Jedenfalls verdanken wir die Kenntnis des Verhaltens der Höhenstrahlen in der Stratosphäre bis rund 20 km der sportlichen Leistung Piccards und bis etwa 30 km dem experimentellen Geschick Regeners. Aber die Hauptfrage nach der Entstehung der Höhenstrahlen konnte bisher erst durch den negativen Befund beantwortet werden, daß die zur Zeit bekannten und vorstellbaren Prozesse höchster Energieumsätze die Erzeugung der Strahlen nicht zu erklären vermögen, jedenfalls nicht die der härtesten. So bleibt also für die Forschung noch ein weites Feld zur Betätigung, auf dem ganz unglaublich viel gearbeitet wird, enthält doch z. B. ein einziges wahllos herausgegriffenes Heft des 14tägig erscheinenden „Physical Review" (Bd. 49, 1936, Nr. 8) allein sieben Veröffentlichungen aus diesem Gebiet.

Die Höhenverteilung in der Atmosphäre

Die Kenntnis der Höhenverteilung d. h. die Zunahme der Intensität der Strahlung mit wachsender Höhe war, wie erwähnt, die Existenzfrage der neuen Erscheinung. Sie konnte bereits im Jahre 1914 durch die Durchmessung vom Erdboden bis zu 9400 m, also etwa im Bereich der ganzen Troposphäre, entschieden werden. Die quantitativen Angaben Kolhörsters beruhen auf mehr als 1000 Einzelwerten, die er mit seinen Strahlungsapparaten in verschiedenen Höhen während der Sommermonate 1913 und 1914 erhielt. Ihnen stellte R. A. Millikan erst 1923 einen einzigen Wert gegenüber, auf Grund dessen er Kolhörsters Angaben bezweifeln zu müssen glaubte. Dieser Wert wurde sogar gegen die Existenz der Strahlung ins Feld geführt, obwohl R. A. Millikan nicht einmal die Höhe anzugeben vermochte, für welche er gelten sollte, ja selbst zugab, daß dieser Wert von unkontrollierbaren Temperatureinflüssen entstellt ist. Demgegenüber brachten die in den folgenden Jahren bis in die neueste Zeit bei Flugzeug- und Freiballonaufstiegen gewonnenen Ergebnisse anderer Forscher eine ausgezeichnete Bestätigung der ersten Durchmessung. Von diesen sind besonders die Beobachtungen von Suckstorff 1933 wertvoll, da sie wegen einheitlicher instrumenteller und methodischer Durchführung mit Kolhörsters Messungen am besten vergleichbar sind. Sie zeigen, daß die Strahlung seit 1913/1914, d. h. über einen Zeitraum von 20 Jahren, nahezu konstant geblieben ist. Sie bestätigten ferner die von Kolhörster gefundene große Anomalie im Verlauf der Strahlungszunahme zwischen 6 und 7 km Höhe, ebenso den von ihm beobachteten Einfluß der Temperaturumkehr- oder Sperrschichten auf die Höhenverteilung. In diesen Sperrschichten scheint eine noch unbekannte, wahrscheinlich radioaktive

Zusatzstrahlung aufzutreten, die sich mit zunehmender Erhebung vom Boden immer stärker bemerkbar macht.

Erst in neuester Zeit, seit 1932, konnten diese frühen Messungen durch die bekannten Stratosphärenaufstiege von Piccard und Cosyns, von russischen und von amerikanischen Forschern bis auf rund 20 km und gleichzeitig durch die Registrieraufstiege Regeners bis auf zunächst 20, nunmehr 33 km Höhe erweitert werden.

Die Ergebnisse aller dieser Untersuchungen der Höhenverteilung mit ungepanzerten Apparaten zeigen, daß die Strahlung von etwa 2 I am Erdboden[1] allmählich und zunächst langsam, dann verstärkt bis schließlich auf rund 330 I in etwa 30 km Höhe ansteigt, um dann nahezu konstant zu bleiben. In diesem Anstieg zeigen sich zwei Anomalien: die bereits erwähnte für Höhen zwischen 6—7000 m (400 und 300 mm Quecksilber) und eine noch stärkere über 12000 m (zwischen 200 und 100 mm Quecksilber), wofür Erklärungen heute noch nicht mit Sicherheit gegeben werden können.

Auch die mit Zählrohren an Einzel- und koinzidierenden Strahlen von Regener mit Pilotaufstiegen bis etwa 23 km Höhe gemessenen Intensitätswerte scheinen ähnlich zu verlaufen, doch liegen noch zu wenig Beobachtungen vor, um Näheres darüber aussagen zu können. So ist denn heutigen Tages die mit Ionisationskammern gemessene Höhenverteilung im Verlauf der Troposphäre, also bis rund 10 km Höhe, recht gut quantitativ bekannt. Es bleiben allerdings noch die Werte aus größeren Höhen der Stratosphäre eingehender zu erforschen, insbesondere die Absolutwerte.

Verteilung in der Erdkruste

Die Untersuchungen des Intensitätsverlaufes der Höhenstrahlen nach Durchsetzen der Atmosphäre wurden meist durch Versenken der Apparate im Wasser vorgenommen, weil Wasser noch am einfachsten als Absorber zu verwenden und nahezu frei von radioaktiven Störstrahlen ist. Die gegenteilige Behauptung R. A. Millikans wurde durch eigens dazu vorgenommene Messungen z. B. von Regener im Bodensee widerlegt. Schon die ersten derartigen Beobachtungen über den Verlauf der Höhenstrahlenintensität bei Versenken im Wasser (Kolhörster) ergaben ein für die damalige Zeit schwer vorstellbares Durchdringungsvermögen von mehr als 10 m Wasser, also zusammen mit dem bereits durchsetzten Wasseräquivalent der Atmosphäre von 10 m, ein Durchdringungsvermögen von wenigstens 20 m Wasser. In der Folgezeit wurden solche Versenkmessungen bis zu immer größeren Tiefen, von Regener schließlich bis 230 m

[1] I bedeutet die Anzahl der von einer ionisierenden Strahlung in einem Kubikzentimeter Luft von 760 mm Hg-Druck und 0° Celsius in einer Sekunde erzeugten Ionenpaare. Siehe auch S. 213.

im Bodensee ausgeführt. Doch sind, wie sich eben erst ergeben hat, Regeners Messungen durch radioaktive Einwirkungen der verwendeten Anodenbatterien entstellt. Dabei nimmt die Wirkung der Höhenstrahlen allmählich so weit ab, daß sie im Störspiegel der Instrumente untergeht. Es kommt daher alles darauf an, den Störspiegel oder die Reststrahlung möglichst herabzudrücken und genau genug zu bestimmen, wenn man die letzten Spuren der Höhenstrahlen untersuchen will. Zunächst nahm man ohne weitere Prüfung an, daß in noch größeren Tiefen die Höhenstrahlung vollständig absorbiert sei, so daß die auch dann noch gefundene ganz geringe Ionisation in den Meßinstrumenten, d. h. die Reststrahlung, nunmehr nur noch von den radioaktiven Verunreinigungen in den Apparaten selbst herrühren sollte. Man bestimmte diese Reststrahlung in Bergwerken, allerdings nicht in Kohlenbergwerken, wo die Radioaktivität der Kohle und Gesteinsmassen Störstrahlen erwarten ließ und tatsächlich auch zeigt, sondern in Steinsalzbergwerken, wo das strahlenfrei vorausgesetzte Steinsalzgebirge die Störstrahlen umgebender Gesteinsmassen abschirmt. Doch ergaben Untersuchungen von Kolhörster, daß auch Steinsalz noch radioaktive Strahlen liefert. Diese rühren von den im Steinsalz vorkommenden Spuren von Kalisalzen her, deren γ-Strahlen Kolhörster kurz vorher entdeckt hatte. Nunmehr konnten auch diese Störstrahlen berücksichtigt werden, doch erzielte er erst mit seiner Koinzidenzmethode die endgültige Entscheidung. Koinzidenzen werden nämlich bei genügend dicken Zählrohrwandungen allein von Höhenstrahlen, nicht mehr von radioaktiven Störstrahlen hervorgerufen. Mit koinzidierenden Zählrohren werden letztere also ausgeschaltet und so gelang es Kolhörster einzelne Höhenstrahlen noch bis 700 m Wassertiefe oder bis 325 m Tiefe im Gestein nachzuweisen. Aus dem in verschiedenen Tiefen bestimmten Absorptionskoeffizienten dieser härtesten Bestandteile des Höhenstrahlengemisches geht hervor, daß erst nach etwa 1000 m Wasser die letzten noch nachweisbaren Höhenstrahlen verschwunden sind. Wie außerordentlich empfindlich die angewandte Methode ist, erhellt daraus, daß von rund 2000 Strahlen in der Stunde noch 5 Strahlen als Höhenstrahlen erkannt werden konnten d. h. also, daß in den größten Tiefen bei etwa 700 m Wasser nur 1 Strahl aus der Vertikalen während eines Tages ein horizontales Quadratzentimeter durchsetzt. Diese härtesten Strahlen kommen zu etwa 1% in dem am Erdboden gemessenen Höhenstrahlengemisch vor. Machen wir uns die Bedeutung einer so außerordentlich hohen Durchdringungsfähigkeit etwas klarer, so kann man sagen, daß erst Stahlpanzer von 100 m Dicke, also der doppelten Höhe eines normalen Kirchturms von 50 m, vor diesen härtesten aller bekannten Strahlen zu schützen vermögen! Eine solche Tatsache spricht sehr für den kosmischen Ursprung der Höhenstrahlen, ebenso wie die bereits über Jahrzehnte beobachtete Konstanz der Strahlungsstärke innerhalb weniger Prozente Schwankung, in welcher zudem noch die experimentellen und statistischen Unsicherheiten stecken.

Richtungsverteilung

Die Intensität der Höhenstrahlung hängt von der über dem Beobachtungsort lagernden absorbierenden Masse ab, wobei diese Masse vom Atmosphärengipfel gerechnet wird, weil ja die Strahlung von außen her an die Erde herankommt. Bei den verschiedenen Substanzen wie Luft, Wasser, Gestein usw. rechnet man alles auf Wasseräquivalent (W.-A.) um, d. h. auf die Höhe einer an Gewicht gleichen Wassersäule von 1 cm^2 Querschnitt. Es beträgt z. B. das für die Schwächung maßgebliche Wasseräquivalent der Atmosphäre (76 cm Quecksilber) für einen senkrecht zur Erdoberfläche ankommenden Höhenstrahl etwa 10 m (W.-A.); wird in 20 m Tiefe in Gestein der Dichte 2,5 gemessen, so muß der senkrechte Strahl $20 \cdot 2{,}5 + 10 = 50 + 10$, also insgesamt 60 m (W.-A.) durchsetzt haben. Je längere Wege der Höhenstrahl in einem Medium zurücklegt, um so mehr wird er geschwächt. Fällt also die Strahlung, wie wir einmal annehmen wollen, am Gipfel der Atmosphäre gleichmäßig aus allen Richtungen d. h. isotrop ein, und gelangt schließlich zum Beobachtungsort am Erdboden, so nimmt für wachsende Neigungswinkel der Strahlen gegen die Vertikale Weglänge und durchsetzte Masse, also auch die Schwächung zu. Die stärkste Strahlung sollte mithin am Beobachtungsort vom Zenith her kommen und nach geneigteren Richtungen hin abnehmen, bis schließlich von der Horizontalen her kaum mehr Strahlung zu erwarten ist. Aus der isotrop angenommenen Verteilung am Gipfel der Atmosphäre ergibt sich also am Erdboden eine ungleichmäßige Verteilung in der Vertikalen, hervorgerufen durch die Absorption in der Atmosphäre.

Ein solches Verhalten zeigen nun ungefähr alle Messungen der Richtungsverteilung in der Vertikalen am Boden oder bis in nicht allzu große Höhen. Daraus folgt für das Verhalten des Strahles selbst, daß beim Durchsetzen auch sehr dicker Schichten der Strahl noch nicht wesentlich aus seiner ursprünglichen Richtung vor Beginn der Absorption abgelenkt wird und daß seine energiereichen Sekundärstrahlen ebenfalls in Richtung des Primärstrahles weiterlaufen.

Die fast geradlinige Fortpflanzung der Höhenstrahlen wird verständlich, wenn man annimmt, daß sie eine sehr große Wucht (hohe kinetische Energie) besitzen. Denn sonst müßten sie bei den vielen Millionen Zusammenstößen mit Atomen sehr stark zerstreut werden. Die Höhenstrahlen haben aber nicht alle gleich hohe Energien, also gleich große Durchdringungsfähigkeit. Infolgedessen ist auch die an ein und demselben Ort beobachtete Richtungsverteilung verschieden für harte oder weiche Strahlen. Ionisationskammern, welche die weicheren Anteile des Strahlengemisches bevorzugen, ergeben mithin größte Ionisationswirkung aus einem Kreis des Himmelsgewölbes um die Vertikale bis etwa 25° Zenithabstand, während mit Zählrohren ein größerer Kreis bis 40° für das Maximum gemessen wird, weil sie die weichen Strahlen nicht bevorzugen. Die Richtungsverteilung hängt also von der Durchdringungsfähigkeit (Härte) und der Zerstreuung der

Strahlen ab, so daß man umgekehrt diese Eigenschaften aus der gemessenen Richtungsverteilung ableiten kann.

Macht man Richtungsmessungen bei verschiedenem Azimut z. B. in einem West—Ost gerichteten Vertikal, so sollte bei gleichem Zenithabstand kein Unterschied in den Ergebnissen auftreten, wenn unsere Voraussetzungen allseitigen gleichmäßigen Einfalls an der Atmosphärengrenze zutreffen. Dies ist in der Tat der Fall bei Beobachtungen in höheren geomagnetischen Breiten, stimmt aber immer weniger, je mehr man sich dem magnetischen Äquator nähert, der ähnlich wie der geographische Äquator verläuft. Die in niederen Breiten beobachtete azimutale Asymmetrie der Strahlung, die sich z. B. in einer stärkeren Intensität aus Westen gegenüber der aus Osten zeigt, beweist, daß schon bei Erreichen der Atmosphärengrenze über dem Beobachtungsort die Strahlung ungleichmäßig verteilt eintraf. Wie ein solches Verhalten durch den Einfluß des erdmagnetischen Feldes auf die geladenen Teilchen der primären Höhenstrahlung zu erklären ist, wird noch eingehender erörtert werden.

Der Barometereffekt

Die Abhängigkeit der Strahlungsstärke von der über dem Beobachtungsort lagernden absorbierenden Masse, wie sie die Höhenverteilung ergibt, muß auch bei den Messungen unter verschiedenem Barometerstand oder Luftdruck zu finden sein; hat doch wechselnder Luftdruck dieselbe Bedeutung als ob der Strahlungsapparat bei konstantem Druck entsprechend gehoben oder gesenkt wird, wobei die den Betrag der Absorption bedingende Luftschicht entsprechend verringert bzw. vergrößert wird. An gleichem Beobachtungsort ist also bei hohem Luftdruck geringere, bei niederem höhere Strahlungsstärke gegenüber den Durchschnittswerten zu erwarten, mit anderen Worten: die Strahlungsstärke verläuft spiegelbildlich zum Barometerstand am Beobachtungsort. Diesen Barometereffekt konnten Myssowsky und Tuwim zum erstenmal im Betrage von einigen Prozenten der mittleren Strahlungsstärke auf ein Zentimeter Änderung des Barometerstandes experimentell nachweisen. Man muß daher unter verschiedenen Luftdruckwerten gemessene Intensitäten zum Vergleich auf ein und denselben mittleren Barometerstand korrigieren. Übertrieben gesprochen ist es ja auch nicht angängig, in verschiedenen Höhenlagen beobachtete Intensitäten ohne weiteres miteinander zu vergleichen, wenn das auch früher gelegentlich geschehen ist.

Obwohl der Barometereffekt selbst und die normalen Luftdruckänderungen nicht groß sind, ist die aus ihnen sich ergebende Korrektion bei der inzwischen erreichten Meßgenauigkeit unbedingt anzuwenden. Leider jedoch sind die numerischen Werte des Barometereffekts noch unsicher und selbst das außerordentlich umfangreiche Material der Dauerregistrierungen hat noch keine endgültigen Ent-

scheidungen insofern gebracht. Zwar ergeben die Registrierungen einen ungefähr konstanten Wert im Mittel über lange Zeit, über kürzere Zeit indessen (selbst bei Zehntagemitteln) ganz erhebliche und unregelmäßige Schwankungen des Effektes bis $\pm 50\%$ seiner durchschnittlichen Größe. Wodurch diese Schwankungen im einzelnen hervorgerufen werden läßt sich einigermaßen erklären; aber der Effekt ist in seinem Verhalten noch nicht soweit erkannt, daß man aus bestimmten, vorliegenden Bedingungen etwa angeben könnte, welche Zahlenwerte bei der Korrektion gerade in dem betrachteten Fall einzusetzen sind. Diese Unsicherheit beeinträchtigt natürlich die Güte der auf Normaldruck korrigierten Messungen und die sonst erreichbare Meßgenauigkeit mit Ionisationskammern. Schon bei 1 cm Luftdruckänderung werden für kurzzeitige Beobachtungen die Korrektionen so unsicher, daß sie die Meßgenauigkeit oder den mittleren Meßfehler um 200 und mehr Prozent übersteigen können. Diese noch immer bestehende Unsicherheit ist für alle feineren Untersuchungen auf die Dauer nicht erträglich. Wahrscheinlich spielen die Schwankungen zweiter Art (s. S. 230) dabei eine wesentliche Rolle, die ihrerseits vielleicht durch geringe, zeitlich wechselnde Zusammensetzung des Strahlengemisches nach Energieverteilung und Ladungsvorzeichen der einzelnen Teilchen bedingt sein könnten. Unter den Einwirkungen des erdmagnetischen Feldes und seiner Schwankungen werden die an und für sich kleinen Unterschiede soweit verstärkt, daß sie die in Erdnähe beobachteten Schwankungen zweiter Art ergeben. Auch Schwankungen des Barometerstandes vermögen, abgesehen von der direkten Absorptionsänderung, die im erdmagnetischen Felde weit auseinandergezogenen Strahlen geringer Energieunterschiede so zu beeinflussen, daß die Strahlungsstärke am Beobachtungsort sich meßbar ändert. Jedenfalls sollte unsere Kenntnis vom Barometereffekt mit allen Mitteln besonders gefördert werden, um bei den Untersuchungen periodischer und unperiodischer Schwankungen der Höhenstrahlung befriedigendere Ergebnisse zu erzielen.

Schwankungen der Höhenstrahlen

An ein und demselben Beobachtungsort am Erdboden oder in niederen Höhen ausgeführte Messungen der Höhenstrahlen lassen keine größeren Schwankungen der Strahlenstärke im Tages- und Jahresverlauf erkennen. Vielmehr erweisen sich über längere Zeiten gemittelte Werte innerhalb einiger Prozente als nahezu gleich. Für die beobachteten geringen Abweichungen kommen als unperiodische Änderungen in Betracht: die sogenannten Stöße, statistische Schwankungen, Schwankungen zweiter Art und der Barometereffekt.

Bei Messungen mit Ionisationskammern treten sogenannte Stöße auf, d. h. verhältnismäßig selten, unregelmäßig und ganz unvermittelt werden sehr große Mengen von mehreren Millionen Ionen auf einmal ausgelöst, die sich durch

einen ruckweisen Sprung in der Registrierung bemerkbar machen. Sie wurden von Hoffmann entdeckt und von Hoffmann und Pforte durch Beobachtungen im Bergwerk, wo sie ausblieben, als der Höhenstrahlung eigentümlich erkannt. Sie sind besonders in letzter Zeit wegen ihrer viel stärkeren Zunahme mit der Höhe gegenüber der gewöhnlichen Ionisationszunahme eingehend untersucht worden. Man kann sie vielleicht als Kernexplosionen deuten, bei denen eine sehr große Anzahl ionisierender Sekundärstrahlen gleichzeitig entsteht. Für das Studium des Verhaltens energiereicher Strahlen beim Durchgang durch Materie bieten die Stöße ganz neue Gesichtspunkte, weshalb sie in letzter Zeit besonders von amerikanischen und englischen Forschern untersucht worden sind. Sie dürften sich nur quantitativ von den sogenannten Schauern unterscheiden, insofern sie aus mehreren hundert gleichzeitigen Einzelstrahlen bestehen, während man bei geringerer Anzahl von Einzelstrahlen von Schauern spricht. Infolge ihres verhältnismäßig seltenen Auftretens in Seehöhe stören sie die eigentlichen Messungen kaum, da sie leicht als Unregelmäßigkeiten kenntlich werden und so außer Ansatz bleiben können. Ebenso sind die statistischen Schwankungen keine ernstliche Störungsquelle. Sie kommen dadurch zustande, daß die verhältnismäßig geringe Anzahl der Höhenstrahlen selbst bei großen Ionisationskammern so ungleichmäßig über die Zeit verteilt auftritt, daß ihr numerischer Wert zufallsmäßig mathematisch um den Mittelwert schwankt. Die statistischen Schwankungen sind daher berechenbar und betragen beispielsweise bei einstündigen Messungen etwa $\pm 1\%$ des Mittelwertes bei den üblich verwendeten Kammerabmessungen. Sehr störend wirken sich dagegen die Schwankungen zweiter Art aus, womit man unvermittelt einsetzende und dann langsam abklingende Intensitätsänderungen im Ausmaß einiger Prozente bezeichnet. Die Ursache für ihr Auftreten ist bisher völlig unbekannt. Sie zeigen eine gewisse Ähnlichkeit mit dem Verlauf der magnetischen Störungen und könnten sehr wohl im direkten oder indirekten Zusammenhang mit diesen stehen wie auf Seite 229 angedeutet. Die stärksten unperiodischen Schwankungen ruft jedoch der Barometereffekt hervor, worüber bereits berichtet wurde. Die beiden letztgenannten Störungsquellen sind deswegen so besonders unangenehm, weil sie ohne vorherzusehende Ursachen plötzlich einsetzen und jegliche Anhaltspunkte zur genaueren Abschätzung des Betrages der Störungen bisher fehlen.

Untersuchungen periodisch verlaufender Schwankungen der Höhenstrahlen werden durch diese unperiodischen Schwankungen außerordentlich erschwert, besonders bei geringer Strahlenstärke am Erdboden oder in geringen Höhen. Hinzukommt, daß man bis vor kurzem längere Beobachtungsreihen, also Dauerregistrierungen, nur mit Ionisationskammern, meist mit großen, ausgeführt hat. Diese liefern Mittelwerte, die sich erstens über das gesamte, aus allen Himmelsrichtungen einfallende Strahlenbündel und zweitens über längere Beobachtungszeiten von meistens 1 Stunde erstrecken. Dadurch werden natürlich kürzerdauernde

Schwankungen sehr weitgehend ausgeglichen. Versucht man die Schwankungen zu erhöhen, indem man bestimmte Richtungen durch Panzer aus dem Höhenstrahlenbündel ausblendet, so treten schwer abschätzbare, störende Zusatzstrahlen auf, die von der Eigenaktivität des Panzermaterials und der Bildung von Sekundärstrahlen in dem Material herrühren. Jedenfalls sind große Ionisationskammern für Schwankungsuntersuchungen prinzipiell deswegen nicht besonders geeignet, weil sie die Schwankungen ausgleichen und richtungsunabhängige Werte liefern. So haben denn Untersuchungen über Periodizitäten mit großen Ionisationskammern, auf die man in Anbetracht ihrer Wichtigkeit bisher eine Unsumme von Arbeit und Kosten verwendet hat, wenig befriedigende Ergebnisse geliefert. Man findet mit ihnen unter Ausschluß aller bekannter radioaktiver Strahlen durch genügend dicke Panzer eine tägliche Periode mit Schwankungen von einigen Promille und Höchstwerten zu Mittag oder zu den frühen Nachmittagsstunden. Einige Forscher schließen daraus auf eine ganz geringe, direkte oder indirekte Sonnenwirkung, andere glauben aus demselben Material Andeutungen für eine Sternzeitperiode herauslesen zu können. Eingehende Diskussionen dieses Materials haben aber ergeben, daß neben den vorher erwähnten unperiodischen Schwankungen auch noch sonstige, vielfach meteorologische Einflüsse wie z. B. die Außentemperatur in die gemessenen Werte eingehen. Eine Übereinstimmung über die mit Ionisationskammer gewonnenen Ergebnisse der periodischen Schwankungen im Tagesverlauf war daher noch nicht zu erreichen.

Beobachtungen in großen Höhen, wie sie erstmalig zum Aufsuchen von Periodizitäten von Kolhörster 1923 und 1924 am Jungfraujoch, 1926 gemeinsam von Kolhörster und von Salis ebendort bis zur Höhe des Mönchsgipfels (4105 m) ausgeführt worden sind und weitere von Büttner, Büttner und Feld und von Salis ließen eine Sternzeitperiode mit angebbaren Extremen erkennen. Dem widersprachen die weiteren Befunde anderer Forscher, allerdings aus Beobachtungen in geringerer oder nur Seehöhe. Trotzdem ergab die statistische Behandlung des bis 1928 vorliegenden Materials durch Corlin, daß „die Übereinstimmung in den verschiedenen Meßreihen kein Spiel des Zufalls sein kann, die Sternzeitperiode also reell ist.“ Da spätere Registrierreihen anderer Forscher wie Hoffmann, Heß und Mitarbeiter, besonders mit großen Kammern und bis rund 2500 m Höhe, indessen wieder gegen sternzeitliche Einflüsse sprachen, so hat man sich seitdem mit diesem Ergebnis fast allgemein zufrieden gegeben. Trotzdem wäre es angebracht, Versuche mit der neueren Beobachtungstechnik, also mit richtungsempfindlichen koinzidierenden Zählrohren und vor allem in großen Höhen wegen der dort geringen Luftdruckschwankungen und somit Fehlens dieser sonst so wesentlichen Störungsquelle, wieder aufzunehmen. Zeigen doch bereits ähnliche Versuche im Flachland von Kolhörster und Jánossy, daß in der Tat sternzeitliche Einflüsse im Tagesverlauf der Höhenstrahlung vorliegen und daß in der ersten ununterbrochenen Jahresregistrierreihe von Kolhörster und

Mitarbeitern (Potsdam 1935) eine Periode nach Sternzeit neben der bekannten nach Sonnenzeit deutlich hervortritt.

Auch über den Jahresverlauf der Strahlung ist man sich noch nicht einig geworden, obwohl doch so ausgedehnte Mittelwerte wie die Monatsmittel und mehrjährige Registrierreihen bereits zur Verfügung stehen. Einerseits wird Konstanz, andererseits geringe Schwankung der Strahlungsintensität angegeben. Jedenfalls ergeben die Dauerregistrierungen mit Ionisationskammern, daß an den betreffenden Beobachtungsorten größere periodische Intensitätsänderungen im Tages- sowie Jahresverlauf bisher nicht aufzufinden waren. Wegen der Erdrotation ist daher anzunehmen, daß in genügend weiter Entfernung von der Erde an den Stellen im Weltenraum, wo das erdmagnetische Feld nicht mehr wirkt, die Strahlung im großen und ganzen fast gleichmäßig aus allen Richtungen verteilt eintrifft. Allerdings kann die Ablenkung der Strahlen im erdmagnetischen Feld zugleich mit der Erdrotation auch Unterschiede in der Richtungsverteilung stark verwischen, besonders wenn Energieverteilung und Ladungsvorzeichen der Teilchen wirklich schwanken sollten (s. S. 229).

Geographische und geomagnetische Verteilung

Die Höhenstrahlung ist an der Erde bisher jederzeit und ganz ausnahmslos auf allen Festländern und Meeren zwischen + 81° und — 69° geographischer Breite, ferner auf Bergen und bei Luftfahrten bis zu den größten nunmehr erreichten Höhen von 33 km gefunden worden. Die seit etwa 1926 an verschiedenen Orten Europas und Amerikas beobachteten Strahlungswerte ergaben zunächst für alle Orte gleiche Intensität bis auf eine 10 Jahre frühere Messung Kolhörsters von 1916 in Konstantinopel (+ 41° geographischer Breite). Er fand nämlich bei Wasserversenkmessungen dort eine Strahlungsabnahme gegenüber seinen entsprechenden Beobachtungen in Mitteldeutschland. Infolgedessen wies Kolhörster schon damals auf die Analogie mit Polarlichtern hin, indem er eine auf geomagnetischen Einflüssen beruhende Intensitätsverteilung über die Erdoberfläche und zeitliche Intensitätsschwankungen wie bei Polarlichtern erörterte. Indessen verhinderten Krieg und Nachkriegsjahre diesbezügliche Beobachtungen auf Reisen und Expeditionen zu verwirklichen. Außerdem war damals die Möglichkeit nicht von der Hand zu weisen, daß etwa aufgefundene örtliche Intensitätsunterschiede durch ungleichmäßige Verteilung der Luftmassen über den verschiedenen Zonen der Erde bedingt seien, also eine geographische Breitenverteilung hervorrufen könnten. Jedenfalls war eine solche Deutung im Zusammenhang mit anderen geophysikalischen Beobachtungen wie Ultraviolettstrahlung der Sonne und Zodiakallicht, die für eine starke Abplattung der Atmosphäre nach den Polen hin zu sprechen scheinen, damals noch nicht auszuschließen. Die ersten über größere Gebiete ausgedehnten Intensitätsmessungen zur Prüfung

eines Breiteneffekts von R. A. Millikan und Mitarbeitern ergaben, daß zwischen + 60° und — 10° geographischer Breite keine Intensitätsunterschiede zu finden seien, so daß die Autoren das Auftreten eines Breiteneffektes in Abrede stellten und um so mehr die Wellennatur der Strahlung betonten. In Wirklichkeit hätte, wie wir heute wissen, eine Abnahme von 15% gefunden werden müssen. Das beobachtete bald darauf Clay zwischen Holland (Amsterdam) und Java (Bandoeng). Er fand eine Intensitätsabnahme nach Süden zu und berief sich dabei ausdrücklich auf die 10 Jahre früheren Ergebnisse Kolhörsters in Konstantinopel. Inzwischen konnten Bothe und Kolhörster mit ihren Koinzidenzversuchen zeigen, daß die am Erdboden beobachtete Höhenstrahlung elektrisch geladene Teilchen enthält, welche die primäre Höhenstrahlung darstellen. Diese müßte dann oberhalb der Grenze der Atmosphäre, wo sie noch unvermischt mit Sekundärstrahlen auftritt, wie die Polarlichter im erdmagnetischen Felde etwa entsprechend der Birkeland-Störmerschen Theorie abgelenkt werden. Es würde jedoch kein Breiteneffekt auftreten, wenn die geladenen Teilchen erst beim Durchsetzen der Atmosphäre als Sekundäre aus einer primären Gamma- oder Photonenhöhenstrahlung entstehen. Denn dann wären die im Erdfelde zurückgelegten Strecken zu kurz, um bei einer solchen immer noch recht energiereichen Sekundärstrahlung wirksam zu werden. Dies von Bothe und Kolhörster vorgeschlagene Experimentum crucis führte zu ausgedehnten Untersuchungen über die Breitenverteilung. Bothe und Kolhörster selbst machten zunächst Messungen auf einem Schiff zwischen + 52 und + 81° geographischer Breite und von 24° westlicher bis 25° östlicher Länge. Sie konnten hier keine Intensitätsänderungen feststellen, was sich später auch durchaus bestätigt hat. Wegen fehlender Mittel war es ihnen aber auch nicht möglich, die Untersuchungen nach Süden auszudehnen. Da neue Messungen von Millikan und Mitarbeitern bis über den Äquator hinaus auch diesmal keinen Breiteneffekt ergaben, wurde das Bestehen dieses Effektes bereits wieder in Frage gestellt, aber sehr bald darauf durch die von A. H. Compton organisierte Durchmessung über die ganze Erdoberfläche und durch weitere Beobachtungen von Clay und einer ganzen Reihe anderer Forscher erwiesen. In Seehöhe zeigen die Beobachtungen von den höchsten geomagnetischen Breiten bis zu etwa 50° keine besondere Änderung, jedoch von da an bis zum Äquator eine Intensitätsabnahme von rund 15%. Die gesamten Messungen gestatten es schon heute, einen ungefähren Überblick über den Intensitätsverlauf an der Erdoberfläche zwischen + 80 und — 70° geographischer Breite zu geben. Nur das Innere Asiens ist noch unvermessen. Die Linien gleicher Höhenstrahlungsintensität, die Isokosmen, verlaufen ungefähr so wie die Linien gleicher Nordlichthäufigkeit nach den Untersuchungen von Fritz. Diese Übereinstimmung weist offenbar daraufhin, daß beide Strahlenarten, Polarlichter wie Höhenstrahlen, in ähnlicher Weise vom erdmagnetischen Felde beeinflußt werden.

Ferner fand Clay, daß auch eine Abhängigkeit der Strahlungsintensität von der magnetischen Länge auftritt. Diese läßt sich dadurch erklären, daß der dem Erdfeld gleichwertige magnetische Dipol nicht mit dem Massenmittelpunkt der Erde zusammenfällt, sondern etwa 300 km von diesem in Richtung 108° östlicher Länge anzunehmen ist. Dann ergibt sich, wie beobachtet, auf der östlichen Halbkugel stärkere magnetische Intensität und daher geringere Höhenstrahlenintensität gegenüber der westlichen Erdhälfte. Die größte Strahlungsstärke liegt bei etwa 12° westlicher, die geringste bei etwa 108° östlicher geographischer Länge. Die Schwankungen im Längeneffekt bleiben unter 5% der mittleren gemessenen Intensitäten.

Der Breiteneffekt nimmt mit der Höhe stark zu, wie Intensitätsmessungen auf hohen Bergen und auf Luftfahrten unter verschiedenen Breiten ergeben haben. Infolge der starken Strahlungsintensität in 16—18 km Höhe von etwa 300 I konnte z. B. Cosyns bei einer längeren Stratosphärenfahrt die schnelle Änderung der Intensität mit der Breite in dieser Höhe auf einem und demselben Flug direkt beobachten. An der Grenze der Atmosphäre, also ohne Absorption durch die Luftmassen, sollte das Verhältnis der Intensitäten zwischen Pol und Äquator etwa den Betrag 100 : 1 erreichen, so daß also hoch über den Polen, genauer hoch über den Durchstoßpunkten der erdmagnetischen Achse etwa 100 mal mehr Höhenstrahlung als über dem Äquator einfällt.

Beobachtet man die Höhenverteilung der Strahlen einmal unter hohen magnetischen Breiten und dann am Äquator, so ergibt der Unterschied in dem Verlauf der beiden Kurven die Höhenverteilung derjenigen Strahlen, welche infolge des erdmagnetischen Feldes in Äquatornähe ausgeschaltet worden sind, die also bestimmt aus elektrisch geladenen Teilchen bestehen. Die Höhenverteilung dieser Teilchen ist nun der der Gesamtstrahlung so ähnlich, daß man daraus auf die Identität beider Anteile schließen kann. Demnach muß also die gesamte Höhenstrahlung aus elektrisch geladenen Teilchen bestehen.

Die Theorie der magnetischen Ablenkung durch das Erdfeld führt weiter auf die sogenannte azimutale Asymmetrie. An Orten nämlich, an denen der Breiteneffekt auftritt, findet man, daß die Strahlen nicht aus allen Himmelsrichtungen mit gleicher Intensität am Beobachtungsort eintreffen, insbesondere zeigt sich ein ausgeprägter Unterschied zwischen der Strahlungsstärke aus Westen gegenüber der aus Osten des Beobachtungsortes. Ein West-Überschuß wurde zuerst von Johnson sowie Alvarez und Compton in der für solche Beobachtungen besonders günstig gelegenen Stadt Mexiko (große Höhenlage, Äquatornähe) gefunden und dann auch für andere Orte von anderen Forschern bestätigt. Immer hat sich das Überwiegen der Strahlenintensität aus westlichen Richtungen auf der nördlichen Erdhalbkugel gezeigt. Das bedeutet, daß etwas mehr als die Hälfte der geladenen Höhenstrahlenteilchen positives, daß der Rest negatives Ladungsvorzeichen aufweisen muß.

Schließlich ist noch eine weitere Asymmetrie, der Süd-Nord-Überschuß durch die Theorie der erdmagnetischen Ablenkung vorauszusagen, die ebenfalls von Johnson bestätigt wurde. Diese Asymmetrie hängt von der Summe der geladenen Höhenstrahlenteilchen ab, während die Ost-West-Symmetrie durch die Differenz der positiven und negativen geladenen Teilchen bedingt wird. Wie nochmals betont sei, treten diese Asymmetrien natürlich nur dort auf, wo der Breiteneffekt sich bemerkbar macht. In Breiten über $\pm 50^0$ in Seehöhe herrscht daher azimutale Symmetrie in der vertikalen Richtungsverteilung der Höhenstrahlen soweit diese magnetischen Effekten unterliegt.

Der Breiteneffekt mit allen seinen Einzelheiten läßt darauf schließen, daß die primäre Höhenstrahlung aus elektrisch geladenen Teilchen hoher Energie besteht. Die Ablenkung der Strahlen durch das erdmagnetische Feld erfolgt bereits in Entfernungen von der Größenordnung einiger Erddurchmesser (6370 km), wo die Strahlung noch keinen wesentlichen Anteil an Sekundären zu bilden Gelegenheit hatte. Es ist also anzunehmen, daß die primäre Höhenstrahlung beim Eintreffen an der Atmosphärengrenze bereits die durch das Erdfeld bedingte ungleichmäßige Verteilung aufweist. Diese Verteilung wird bei dem verhältnismäßig kurzen Wege durch die Atmosphäre vom Magnetfeld selbst nicht mehr wesentlich geändert, wohl aber durch die ganz anders gearteten Absorptionserscheinungen, welche beim Durchsetzen der Atmosphäre die vorher ausführlich erörterte Richtungsverteilung hervorrufen.

Energie der Höhenstrahlen

Zur Bestimmung der Energie elektrisch geladener und schnell bewegter Teilchen benutzt man die Ablenkung solcher Strahlen in magnetischen und elektrischen Feldern. Ersteres Verfahren ist bereits bei der Beschreibung der Nebelkammer erörtert worden, die Ablenkung durch Magnetfelder liefert Kreisbahnen. Bei elektrischer Ablenkung durchlaufen die Teilchen dagegen Parabeln, die Verhältnisse liegen etwa so wie beim horizontalen Wurf, an Stelle des Schwerefeldes tritt das elektrische Feld. Durch Ausmessung der Bahnen und der wirksamen Feldstärke erhält man Masse und Geschwindigkeit der Teilchen mit quantitativer Genauigkeit, so daß man ihre Wucht berechnen kann.

Die Anwendung dieser ausgezeichneten Methode auf Höhenstrahlen unter Benutzung künstlicher Felder ist jedoch wegen ihrer hohen Energie sehr begrenzt. Ein vereinzelter Versuch zur Ablenkung durch starke elektrische Felder hat bisher nicht viel mehr als die Tatsache der Ablenkung selbst erkennen lassen. Auch die stärksten zur Zeit anwendbaren Magnetfelder und die größten Nebelkammern, in denen man Strahlenlängen bis zu 40 und 50 cm photographiert hat, ergeben wegen der hohen Energie der Strahlen noch sicher ausmeßbare Bahnkrümmungen, die Energien bis zu rund 5 Milliarden e-Volt entsprechen. Das sind jedoch

nur recht bescheidene Höhenstrahlen, die gerade noch die Atmosphäre, d. h. 10 m Wasser zu durchdringen vermögen, während der größte Teil der Strahlen doch noch weiter in die Erde eindringt, wenn er nach Durchsetzen der Atmosphäre am Erdboden angelangt ist.

Schätzt man aus dem Durchdringungsvermögen derjenigen Höhenstrahlen, die noch nach 700 m Wasser nachweisbar waren, deren Energie, so müßte sie etwa 70 mal so viel, also 280 Milliarden oder rund $3 \cdot 10^{11}$ e-Volt betragen. Das sind natürlich schon sehr hohe Werte, denen gegenüber die Messungen in künstlichen Feldern nur so kleine Energiebeträge erkennen lassen, daß man geneigt ist, diese den Sekundärstrahlen zuzuschreiben, welche beim Durchsetzen der Atmosphäre oder von Materie in der näheren Umgebung der Instrumente von primären Höhenstrahlen erzeugt wurden. Es zeigt sich auch hier wieder, wie unzureichend unsere irdischen Hilfsmittel gegenüber einer so mächtigen kosmischen Erscheinung wie der Höhenstrahlung sind.

Glücklicherweise besitzen wir in unserer Erde einen Magneten von solchem Ausmaß, daß durch ihn die Höhenstrahlung schon weit außerhalb der Atmosphäre abgelenkt wird. Dort erschwert noch keine Sekundärstrahlung die Deutung der Ergebnisse, so daß keine Unsicherheit über primäre oder sekundäre Strahlen wie im Falle künstlicher Felder besteht. Die Feldstärke unseres Erdmagneten ist zwar klein, nur einige Zehntel Gauß auf den Quadratzentimeter, und läßt auch bezüglich ihrer Gleichförmigkeit noch manches zu wünschen übrig, doch fallen diese „Konstruktionsfehler" bei der großen Ausdehnung des Feldes nicht allzusehr ins Gewicht. Erwünscht wäre allerdings noch eine wesentlich genauere Theorie des Verhaltens geladener Teilchen in einem solchen magnetischen Felde, um dies von der Natur gelieferte Instrument besser auseichen zu können.

Die Erweiterung der Birkeland-Störmerschen Polarlichttheorie auf Höhenstrahlen durch Störmer selbst, Rossi, Epstein, Lemaître und Vallarta führt zu dem Ergebnis, daß geladene Teilchen bestimmter Energie nur dann das Erdfeld überwinden und senkrecht auf die Erdoberfläche bei einer bestimmten geomagnetischen Breite auftreffen können, wenn ihre Energie einen von dieser Breite abhängigen Minimalwert überschreitet, der nach der Theorie ungefähr berechenbar ist. So müssen z. B. am magnetischen Äquator die Teilchen rund $20 \cdot 10^9$ e-Volt oder in 60° magnetischer Breite noch $1{,}2 \cdot 10^9$ e-Volt Energie besitzen, um trotz des Magnetfeldes bis zur Erdoberfläche gelangen zu können. Ohne Bremsung durch die Atmosphäre, wenn wir diese zunächst einmal wegdenken, würde also die Intensität der Höhenstrahlen auf dem Wege vom Pol zum Äquator kontinuierlich abnehmen, da das Erdfeld allmählich immer mehr Strahlen höherer Energie aus dem Gesamtstrome ausschaltet. Dabei sei vorausgesetzt, daß die Höhenstrahlenenergie kontinuierlich verteilt ist. Kommt aber noch die Bremsung durch die Erdatmosphäre hinzu, die dem Teilchen, wenn es

zur Erdoberfläche gelangen will, wenigstens rund $4 \cdot 10^9$ e-Volt kostet, so wird der Verlauf der Strahlungsintensität vom Pol zu niederen Breiten zunächst keine Änderung zeigen, weil ja schon die Atmosphäre allein Teilchen bis zur Energie $4 \cdot 10^9$ e-Volt aus dem Höhenstrahlengemisch entfernt. Dann erst wird von einer bestimmten kritischen Breite an die Intensitätsverminderung bis zum Äquator allmählich einsetzen. Aus solchen Überlegungen und in Verbindung mit den gemessenen Höhenverteilungskurven läßt sich z. B. die oben angegebene Bremswirkung der Erdatmosphäre berechnen und auch die Energien der primären Höhenstrahlung. Letztere ergeben sich im allgemeinen viel höher als bei Nebelkammermessungen in Übereinstimmung mit den Schätzungen aus der Durchdringungsfähigkeit. Die Energien liegen zwischen 10^9 e-Volt bis wahrscheinlich 10^{12} e-Volt. Aus der relativistischen Beziehung zwischen Masse und Energie würde den höchsten Werten etwa Massen vom Atomgewicht über 350 entsprechen, während dem schwersten bekannten Element, dem Uran, nur das Atomgewicht 239 zukommt. Rund 1% der in unseren Breiten am Erdboden eintreffenden Höhenstrahlen besteht nach Kolhörster aus solchen Energieklumpen.

Schätzungen der gesamten Energie der an der Grenze der Atmosphäre einfallenden Höhenstrahlung ergeben für sie etwa gleiche Beträge wie für die Licht- und Wärmemenge, die dort alle Fixsterne liefern. Auf die ganze Erdoberfläche überträgt die Höhenstrahlung eine Energie von etwa $1{,}8 \cdot 10^{16}$ Erg. in der Sekunde oder 2,4 Millionen Pferdestärken. Das Vorkommen der Strahlung im Weltenraum vermag die dort angenommene Temperatur von etwa -273^0 um vielleicht einige Grade zu erhöhen. Die gesamte Höhenstrahlenenergie ist also gar nicht so unbeträchtlich; sie bleibt aber für unsere Meßinstrumente deswegen nicht einfach und leicht meßbar, weil diese zu kleine Ausmaße besitzen und der Strahlung nicht genügend Energie entziehen. Zudem fällt die Strahlung in so großen Energieklumpen ein, daß die Anzahl der Strahlen selbst nur gering ist.

Natur der geladenen Teilchen

Ablenkungsversuche in künstlichen magnetischen Feldern und im großen natürlichen Felde des Erdmagneten haben ergeben, daß der Schwarm der Höhenstrahlenteilchen keine einheitliche elektrische Ladung aufweist, vielmehr zeigt der West-Ost-Überschuß an, daß etwas mehr positiv als negativ geladene Teilchen in der Höhenstrahlung vorhanden sind. Dies hat insofern eine sehr große Bedeutung, weil bei Überwiegen eines Ladungsvorzeichens die Möglichkeit zur Ausbildung sehr hoher Potentialdifferenzen im Weltenraum vorhanden wäre. Bezüglich der negativ geladenen Teilchen herrscht Einstimmigkeit darüber, daß sie aus Elektronen bestehen, während man in den positiv geladenen Teilchen Positronen neben Protonen und Alphateilchen, manchmal auch noch schwerere Kerne zu erkennen glaubt. Das Vorkommen von Positronen ist durch Nebel-

kammeraufnahmen einwandfrei gesichert; gelang es doch Anderson durch solche Aufnahmen, erst die Existenz des Positrons, des Gegenstücks zum negativen Elektron, also die bis dahin unbekannte positive Elementarladung nachzuweisen. Auch für das Vorkommen von Protonen kann man mancherlei anführen, besonders die hohe Durchdringungsfähigkeit der harten Bestandteile der Strahlung, doch müßten dann bei Nebelkammeraufnahmen in Meereshöhe mehr Protonen als üblich zu finden sein. Dagegen ist das Auftreten von Alphateilchen, also positiv geladener Heliumatome mit zwei Elementarladungen oder positiver Teilchen von noch höheren Maßen bisher nicht beobachtet worden und als ganz hypothetisch zu betrachten. Man hat auch vermutet, daß ungeladene Teilchen wie Neutronen, ferner Quantenstrahlen, also Photonen, in der primären Höhenstrahlung vorkommen. Doch kann nach Ausweis der magnetischen Ablenkungserscheinungen die Menge nichtionisierender Strahlen in der primären Höhenstrahlung kaum einige Prozente überschreiten.

Daß dagegen in der am Erdboden, also nach Durchsetzen der Atmosphäre auftretenden Höhenstrahlung ein äußerst komplexes Strahlengemisch vorliegt, dürfte nicht zu bezweifeln sein, wenn man daran denkt, wie sich Höhenstrahlen beim Durchgang durch Materie z. B. nach Ausweis von Nebelkammeraufnahmen verhalten. Man macht sich etwa folgende Vorstellung: Das geladene Teilchen erzeugt beim Zusammenstoß mit einem Atom zunächst Photonen, also Quantenstrahlen, die sich ihrerseits schnell in Elektronenzwillinge, d. h. Positronen und Elektronen, paarweise umsetzen und dann weiter durch Sekundärstrahlbildung ionisieren. Dabei kann die Energie schrittweise langsam, oder wie bei Strahlen höherer Energie wahrscheinlicher, auch explosionsartig weiter abgebaut werden. In letzterem Falle beobachtet man sogenannte Schauer, deren größte wahrscheinlich die Stöße sind. Bei derartigem Durcheinander, Zerstrahlen der Materie in Energie und umgekehrt, Materialisierung von Energie zu Materie, in einer solchen wahren Hexenküche können natürlich alle Möglichkeiten zur Strahlenbildung ausgenutzt werden.

Ursprung der Höhenstrahlen

In früherer Zeit, als man sich langsam an die Vorstellung energiereicherer Strahlen als die radioaktiver Substanzen gewöhnt hatte, konnte man wohl Vorgänge radioaktiver Natur oder Atombildungs- und Zerstrahlungsprozesse anführen, welche die damals noch weit unterschätzte Energie der Höhenstrahlen zu liefern imstande sein sollten. Ja es ließen sich sogar gut übereinstimmende numerische Werte zwischen derartigen Prozessen und der Durchdringungsfähigkeit der verschiedenen Strahlenkomponenten errechnen, so daß man schon „die Geburtsschreie der Wasserstoff-, Helium-, Silicium- und Eisenatome aus dem Weltall zu vernehmen" glaubte. Doch ist diesen etwas romantischen Vorstellun-

gen, die ein physikalisches Gebiet auch dem Nichtfachmann endlich einmal schmackhaft gemacht haben würden, in dem Augenblick der Boden entzogen worden, also die außerordentliche Energie der korpuskularen Höhenstrahlung nachgewiesen worden war. Atombildungs- und Zerstrahlungsprozesse bekannter Elemente, als die größten zur Zeit vorstellbaren Energieumsätze, reichten nun nicht mehr aus, um auch nur die in einem Höhenstrahl mittlerer Durchdringungsfähigkeit angehäufte Energie zu erzeugen. Wollte man noch unbekannte Elemente heranziehen, so müßte man schon an ähnliche Prozesse bei Elementen mit Atomgewichten über 300 denken. Diese wären aber wohl nur bei jungen Sternen zu erwarten oder bei Vorgängen, bei denen das Innere der Sterne aufbricht und wirksam wird, Vorgänge also, die schon seit längerem Nernst allgemeiner und neuerdings Baade und Zwicky für Supernovae, d. h. neue Sterne mit außergewöhnlich starker Energieentwicklung, erkannt haben. Vielleicht ist das sogenannte Nova-Stadium der Fixsterne, das gar nicht so selten ist, vielleicht sind auch die selteneren Supernovae eine derartige Quelle der erforderlich hohen Energieumsätze. Jedenfalls müßte sich nach unserer heutigen Anschauung jede ernst zu nehmende Hypothese über den Ursprung der Höhenstrahlen auf Prozesse stützen können, die eine entsprechend hohe Energieentwicklung vorstellbar erscheinen lassen, wie sie zur Erzeugung dieser Strahlen notwendig erscheint.

Die technische Anwendung der Strahlen

Von Professor Dr. U. Dehlinger

Technik ist sinnvoller Gebrauch von Werkzeugen und wenn im folgenden von Anwendung der Strahlen in der Technik die Rede ist, so wird man zuerst fragen, inwieweit die Strahlen als eigentliches technisches Werkzeug dienen, d. h. in welche technischen Herstellungsvorgänge die Wirkung von Strahlen eingeschaltet worden ist. Durch alle Werkzeuge wird Arbeit geleistet, also physikalisch gesprochen Energie übertragen; den Techniker interessiert dabei vor allem der Nutzeffekt dieser Energieübertragung, d. h. die Frage, welcher Bruchteil der in das Werkzeug hineingesteckten Energie von diesem an die für den beabsichtigten Herstellungsvorgang notwendige Stelle geleitet wird und welcher Bruchteil demgegenüber an andere Stellen kommt, wo er verlorengeht oder sogar schädliche Wirkungen ausüben kann. Es wird sich im folgenden ersten Abschnitt zeigen, daß bei der Energieübertragung durch Strahlen dieser Nutzeffekt im allgemeinen viel kleiner ist als bei der Übertragung durch materielle Bahnen; an Hand der Energieverhältnisse bei der Radioübertragung wird dies näher erläutert werden. Daher ist die Verwendung der Strahlen als technisches Werkzeug verhältnismäßig beschränkt, während die Natur, der es auf Nutzeffekt nicht ankommt, in ganz großem Umfang Energie durch Strahlung überträgt.

Während so die Strahlen einerseits ein Werkzeug von durchschnittlich schlechtem Nutzeffekt sind, bilden sie andrerseits ein sehr feines Werkzeug, das imstande ist, unmittelbar den chemischen Zustand der Atome und Moleküle zu ändern, und zwar in sehr gut abstufbarer Weise. Diese chemische Wirkung der Strahlen wird von der Natur für das Wachstum der Pflanzen in großem Maßstab ausgenützt, konnte aber von der Technik bisher nur in wenigen Fällen erfaßt und verwendet werden. Die Aufzeichnung der Strahlen durch die photographische Platte beruht auf einer solchen chemischen Wirkung.

Die am feinsten abgestufte Anwendung als chemisches Werkzeug finden die Strahlen in der medizinischen Röntgen- und Radiumtherapie, die in einem vorhergehenden Kapitel besprochen wurde.

Außer den in die Herstellung selbst eingeschalteten Werkzeugen braucht die moderne Technik eine ganz andere Art von Einrichtungen, nämlich Kontroll-

mittel zur Überwachung der Herstellungsverfahren. Eine solche Kontrolle ist einmal im laufenden Betrieb nötig, in um so stärkerem Maße, je feiner die Herstellungsverfahren ausgearbeitet sind, außerdem und noch mehr bei den noch nicht in den laufenden Betrieb übergegangenen Herstellungsverfahren, die zur Verbesserung oder Neuentwicklung im Laboratorium versuchsweise ausgeführt werden. Für solche Kontrolleinrichtungen finden nun die Strahlen eine ganz ausgedehnte Anwendung. Dabei kommt es nicht auf den energetischen Nutzeffekt der Strahlenwirkung an, sondern darauf, daß die Strahlen sehr empfindlich gegen Änderungen des durchstrahlten Stoffes sind und daß sie sich sehr leicht mit dem Auge oder mit der photographischen Platte feststellen und aufzeichnen lassen. Am bekanntesten unter diesen Verfahren wurde die Durchleuchtung der Werkstücke mit Röntgenstrahlen zur Feststellung von Fehlstellen, die im Innern liegen; sie entspricht ganz der medizinischen Röntgendiagnostik. Durch andere Verfahren, die ebenfalls in steigendem Maß aus der Wissenschaft in die Technik übergehen, kann man mit Hilfe der Strahlen noch wesentlich tiefere Einblicke in den Zustand der Werkstoffe gewinnen.

Die Anwendung der Strahlen in der Technik bildet ein Gebiet der technischen Physik, das in besonders starkem Maß auf der wissenschaftlichen Physik aufgebaut ist. Während die Technik manches anderen Gebietes sich gleichzeitig mit oder sogar vor seiner wissenschaftlichen Durchbildung entwickelt hat, stützte sich die Strahlungstechnik größtenteils bewußt auf die von der Wissenschaft oft lange vorher gefundenen Erscheinungen und Gesetze.

I. Die Strahlen als technisches Werkzeug

1. Energieübertragung durch Strahlung

a) Die Wellen der drahtlosen Telegraphie

In technischen Utopien wird sehr häufig beabsichtigt, die Energie der Kraftwerke anstatt durch Drahtleitungen durch Wellen oder, was dasselbe ist, durch Strahlen ohne stofflichen Träger zu den Verbrauchern zu bringen, ein Gedanke, der schon durch die zunehmende „Verdrahtung" unserer Städte und Landschaften nahegelegt wird. Ebenso ist immer wieder die Rede von irgendwelchen „Todesstrahlen", also von Strahlen, durch die auf große Entfernungen hin Energie mit solcher Konzentration übertragen werden kann, daß zerstörende Wirkungen ausgeübt werden. Als Beweis dafür, daß solche Dinge physikalisch möglich seien, wird häufig die drahtlose Telegraphie angeführt, bei der ja in der Tat durch elektrische Wellenstrahlung ohne stofflichen Träger eine über die ganze Erde reichende Verbindung hergestellt wird. Im folgenden soll nun die Energieübertragung durch die elektrische Wellenstrahlung der drahtlosen Telegraphie im einzelnen

betrachtet werden, dabei wird sich zeigen, daß bei der Fortpflanzung dieser Wellen stoffliche, in der Atmosphäre vorhandene Leiter eine große Rolle spielen, daß aber trotzdem der Nutzeffekt der Übertragung sehr klein ist, also sehr viel Energie dabei verschwendet wird. Konzentrierte Energie kann daher auf größere Entfernungen mit den heutigen Mitteln der Strahlungsphysik nicht übertragen werden.

In den Antennen der drahtlosen Telegraphie wird von der Sendeapparatur durch Einrichtungen, die hier nicht näher besprochen zu werden brauchen, eine elektrische Schwingung erzeugt, d. h. Strom und Spannung an einem bestimmten Punkt der Antenne bleiben nicht zeitlich konstant, sondern gehen in raschem Wechsel von positiven zu negativen Werten (wobei die negativen Werte der umgekehrten Stromrichtung entsprechen). In dem die Antenne umgebenden freien Raum wird dadurch eine elektromagnetische Welle induziert, d. h. an jedem Punkt des Raums entsteht eine im gleichen Takt wie die Schwingung der Antenne sich ändernde elektrische Spannung; diese Welle breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit von der Antenne aus über den ganzen Raum hin aus. Aus der Antenne geht in die Raumwelle in jeder Sekunde eine ganz bestimmte Energiemenge über, die dann im Raum weitergeleitet wird; dies hat zur Folge, daß die Schwingung in der Antenne gedämpft ist, also an Stärke allmählich abnimmt, wenn ihr nicht von der Sendeapparatur neue Energie zugeführt wird, und aus der leicht zu messenden Dämpfung kann die aus der Antenne ausgestrahlte Energie, berechnet werden. In der Antenne des Empfängers wird durch die Raumwelle eine Schwingung induziert, die dann in den Empfänger weitergeleitet, verstärkt und im Lautsprecher oder Kopfhörer hörbar gemacht wird; durch geeignete Anordnung kann man es erreichen, daß nahezu die ganze in der Nähe der Empfangsantenne vorhandene Energie der Raumwelle ausgenützt wird. Die Frage ist also: Welcher Bruchteil der Leistung des Senders, d. h. der pro Sekunde von der Sendeantenne ausgestrahlten Energie, wird von der Raumwelle in die Nähe der Empfangsantenne geleitet?

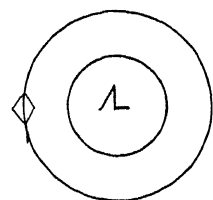



Abb. 1. Ausbreitung der von einem Sender ausgestrahlten Energie

Wenn sich die Welle nach allen Seiten gleichmäßig ausbreiten kann, so kann man in sehr einfacher Weise das Gesetz von der Erhaltung der Energie anwenden. Strahlt z. B. die Sendeantenne eine Leistung von 1 kW aus, so geht in 1 km Entfernung vom Sender diese Leistung durch eine Kugel von 1 km Radius (Abb. 1), also durch eine Fläche von 4π qkm oder 12,5 Millionen qm; durch 1 qm in 1 km Entfernung vom Sender geht also eine Leistung von $^1/_{12500000}$ kW. Eine Rahmenantenne von 1 qm Fläche könnte also allerhöchstens diese sehr kleine Leistung aufnehmen. In einer Entfernung von r km ist die Kugel r^2 mal größer, also die durch 1 qm gehende Leistung noch um diesen Faktor kleiner.

In Wirklichkeit breiten sich die Wellen der drahtlosen Telegraphie nicht nach allen Seiten gleichmäßig aus, wodurch die genannten Zahlen abgeändert werden. Erstens werden die Wellen nämlich vom Erdboden, in dessen Nähe sich ja Sender und Empfänger befinden, absorbiert, wodurch die übertragene Leistung verkleinert wird; Wasserflächen dagegen absorbieren sehr wenig, die Wellen bewegen sich ohne Veränderung entlang ihrer Oberfläche. Zweitens muß bei größeren Entfernungen die Erdkrümmung berücksichtigt werden. Da die Wellen die Erde nicht durchdringen, ist der Empfänger vom Sender durch geradlinige Ausbreitung gar nicht mehr zu erreichen, und nur dadurch, daß die Wellen abgebeugt werden, gelangen sie zum Empfänger. Auch dies ergibt eine Verringerung der übertragenen Leistung. Drittens kann durch geeignet ausgestaltete Sendeantennen eine Richtwirkung ausgeübt, d. h. die ausgestrahlte Welle in einzelnen Richtungen abgeschwächt, in anderen dafür verstärkt werden, so daß die zu einem bestimmten Empfänger übertragene Leistung vergrößert wird. Diese Richtwirkung kann bei langen Wellen nur in beschränktem Umfang erreicht werden; anders ist es bei kurzen Wellen, worauf wir später zurückkommen.

Diese drei Einflüsse konnten, wenn auch in ziemlich komplizierter Weise, zahlenmäßig berechnet werden; als man die errechneten Zahlen mit den tatsächlich an Empfängern gemessenen aufgenommenen Leistungen verglich, stellte sich ein überraschender Tatbestand heraus. Die übertragene Leistung war nämlich größer, als nach der die genannten drei Einflüsse berücksichtigenden Rechnung zu erwarten war. Hätte man sich auf die Rechnung allein verlassen und keine praktischen Versuche gemacht, so wäre man zu der Überzeugung gekommen, daß es nicht möglich sei, über große Entfernungen hin drahtlos zu telegraphieren. Besonders auffallend war der Widerspruch zwischen den theoretischen Vermutungen und der Erfahrung, als man um das Jahr 1920 zu kurzen Wellen mit Wellenlängen unter 100 m überging. Damals ließen sich die Techniker von den ungünstigen theoretischen Erfolgsaussichten überhaupt von Versuchen abschrecken, so daß es amerikanischen Funkamateuren überlassen blieb, trotz der geringen ihnen zur Verfügung stehenden Energie die Verwendbarkeit der kurzen Wellen für einen um die ganze Erde reichenden Funkempfang nachzuweisen.

Eingehendere Versuche mit diesen kurzen Wellen klärten dann bald den Tatbestand auf. Es zeigte sich, daß für die Ausbreitung aller Wellen der drahtlosen Telegraphie, besonders aber der kurzen, zu den drei genannten ein vierter wichtiger Einfluß hinzukommt, nämlich das Vorhandensein zweier Schichten mit erhöhter elektrischer Leitfähigkeit in größeren Höhen der Stratosphäre, an denen die Wellen fast wie an einem Spiegel zurückgeworfen werden. Nach dem Physiker, der schon 1902 darauf hingewiesen hat, daß solche Schichten die Ausbreitung der elektrischen Wellen beeinflussen könnten, werden sie allgemein Heaviside-Schichten genannt. Ihr Abstand von der Erdoberfläche kann nach Abbildung 2 dadurch bestimmt werden, daß man die Zeitdifferenz mißt, die zwischen

dem Eintreffen des unmittelbar an der Erdoberfläche sich ausbreitenden und des an der Schicht gespiegelten Strahles besteht. Da man weiß, daß die Geschwindigkeit der Wellen gleich der Lichtgeschwindigkeit ist, kann man aus dieser Zeitdifferenz den Unterschied der von den beiden Wellen zurückgelegten Wege und daraus die Höhe der spiegelnden Schicht bestimmen. Man findet so bei Tag eine Schicht in ungefähr 125 km Höhe, und eine zweite, stärker ausgebildete in ungefähr 450 km Höhe; bei Dunkelheit verschwindet die erstere und auch die höhere Schicht nimmt an Stärke ab. Man kann das Vorhandensein zweier übereinander liegender Schichten deshalb feststellen, weil die Wellen nicht vollständig an der Schicht gespiegelt werden, sondern je nach der Stärke der Schicht und dem Winkel, unter dem sie auftreffen, zum Teil in sie eindringen und dann an der höheren Schicht gespiegelt werden.

Abb. 2. Wegunterschiede zwischen Bodenstrahl und gespiegelten Strahlen

Die Tatsache, daß die Schichten bei Dunkelheit schwächer sind als bei Tag, läßt darauf schließen, daß sie unter dem Einfluß der Sonnenstrahlen zustande kommen. Und zwar ist es vermutlich die Ultraviolettstrahlung der Sonne, welche die Luftmoleküle ionisiert, d. h. mit positiven oder negativen elektrischen Ladungen versieht. Da diese Jonen den elektrischen Strom transportieren können, also die Luft elektrisch leitend machen, verhält sich eine elektrische Welle, die auf eine ionisierte Luftschicht trifft, ähnlich wie wenn sie auf eine metallisch leitende Platte trifft; sie wird reflektiert, wenn auch wegen der zahlenmäßig viel kleineren Leitfähigkeit nicht so vollständig, wie im letzteren Fall. Die einmal gebildeten positiven und negativen Jonen suchen sich wieder zu vereinigen und damit zu neutralisieren (Rekombination); bei den geringen Drucken und infolgedessen großen Entfernungen der Moleküle in den in Frage kommenden Höhen dauert dies aber stundenlang, so daß auch während der Nacht, wenn die ionisierende Strahlung nicht mehr vorhanden ist, die ionisierte Schicht noch nicht ganz verschwunden ist. Nach Abb. 3 haben die Heaviside-Schichten die Wirkung, daß sie den nach oben ausgestrahlten Teil der Wellen, der ohne ihre Anwesenheit in den Weltraum hinausgestrahlt würde, wieder auf die Erde zurücklenken und für den Empfang nutzbar machen. Sie vergrößern also unmittelbar den Nutzeffekt der Sendung. Andererseits verändern sie sich auch manchmal sehr rasch, was die Hauptursache des Fading ist. Die nahezu senkrecht auf die Heaviside-Schichten auftreffenden Strahlen werden nicht mehr gespiegelt, sondern absorbiert. Deshalb besteht in der Nähe des Senders eine „Tote Zone", in der überhaupt kein Empfang möglich ist, wenn auch die am Boden sich fortpflanzende Welle nicht mehr durchkommt.

Abb. 3. Überwindung der Erdkrümmung durch die Heaviside-Schicht

Wie man sieht, ist „die Welt der Radiowellen“, die uns heute bei Tag und Nacht umgibt, beschränkt auf eine verhältnismäßig dünne Schicht um die Erde; in den Weltraum dürfte von diesen Wellen kaum etwas hinausdringen und ebensowenig wird uns eine funkentelegraphische Botschaft von außen erreichen können. Beidem steht die starke Absorption in der Heaviside-Sicht im Weg, die andererseits allein den transkontinentalen Radioempfang ermöglicht.

Trotz dieses glücklichen Umstandes ist der energetische Nutzeffekt der Übertragung der elektrischen Wellen immer sehr klein, so klein, daß die übertragene Energie fast nie dazu benützt werden kann, die Empfangsapparate selbst anzutreiben, sondern nur dazu, die in den Verstärkern der Empfangsapparate aufgebrachte Energieleistung zu steuern. Man bemüht sich, durch Richtwirkung beim Senden den Nutzeffekt zu steigern. Grundsätzlich werden hierzu dieselben Mittel benützt, wie wenn man sichtbare Lichtwellen in größerer Entfernung konzentrieren will: Man umgibt die Sendeantenne wie die Lichtquelle eines Scheinwerfers mit einem in Form einer Parabel gekrümmten Spiegel, welcher die von ihr nach rückwärts ausgestrahlten Wellen reflektiert und in die gewünschte Richtung bringt (Abb. 4). Der Größe der Wellenlängen muß dabei die Größe des Spiegels angepaßt sein: man stellt ihn daher aus Drähten her, etwa wie in Abb. 5 dargestellt ist. Wie sich gezeigt hat, ist es zweckmäßig, die Sendeantenne in $1/4$ Wellenlänge Abstand vom Parabelscheitel aufzustellen, dann wirken nämlich die in der Sendeantenne selbst und die in den Spiegeldrähten erregten Schwingungen am besten zusammen.

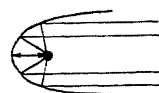



Abb. 4. Strahlengang im parabolischen Spiegel

Eine etwas andere, heute mehr gebrauchte Form der Richtantenne, die schon im ersten Kapitel erwähnt wurde, ist in Abbildung 6 dargestellt. Hier löschen sich die von den einzelnen nebeneinander gestellten Antennendrähten herkommenden Wellen durch Interferenz gegenseitig aus, und nur die senkrecht zur Ebene der Drähte abgestrahlten Wellen verstärken sich. Hinter die Ebene der eigentlichen Antennendrähte wird, auch hier im Abstand von $1/4$ Wellenlänge, eine zweite Ebene als Spiegel gestellt, welche die nach rückwärts gestrahlten Wellen nach vorn reflektiert. Durch diese Richtantennen gelingt es, die ausgestrahlte Welle innerhalb eines Winkels von einigen Graden zusammenzuhalten; die Richtwirkung ist also durchaus nicht mathematisch scharf, und in größerer Entfernung vom Sender bestreicht das Strahlenbündel immer noch einen sehr großen Raum.

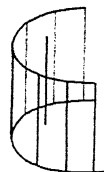



Abb. 5. Parabelspiegel aus Drähten mit Sendedraht in der Mitte

Die Richtwirkung der Empfangsantennen wird ausgenützt beim Funkpeilen. Bekanntlich dient hierbei der Sender als „Leuchtturm“, der statt sichtbaren Lichtes Rundfunkwellen aussendet; die Aufgabe ist dann, die Richtung festzustellen, aus der die Wellen auf das Schiff oder Luftfahrzeug, dessen Ort zu bestimmen ist, auftreffen. Man nimmt hierzu im allgemeinen eine Rahmenantenne und

sucht durch langsames Drehen die Stellung heraus, bei der sie die größte Lautstärke vom Sender erhält; dann steht ihre Ebene senkrecht zur Strahlrichtung und diese ist somit festgelegt (Abb. 7). Selbstverständlich darf man hierbei keine Strahlen benützen, die durch die Heaviside-Schicht oder auch durch Einflüsse der Erdoberfläche aus ihrer Richtung abgelenkt waren, und das Ausmerzen dieser häufig nur wenige Grade betragenden und daher um so gefährlicheren Mißweisungen ist oft schwierig und gelingt nur durch Vergleich zahlreicher Einzelbeobachtungen.

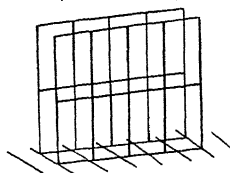



Abb. 6. Neue Form der Richtantenne

Schließlich sollen noch die heute im drahtlosen Verkehr benützten Wellenlängen mit ihren Haupteigenschaften zusammengestellt werden. Wellenlängen von 20 bis 3 km Länge werden im drahtlosen Überseeverkehr der Großstationen benützt. Sie erleiden bei der Fortpflanzung längs des Erdbodens oder der Meeresoberfläche wenig Absorption, die Heaviside-Schicht beeinflußt ihren Weg nicht. Ebenso kommt bei Wellen zwischen 3 und 1 km Länge nur die Bodenwelle in Betracht, die aber schon stärker absorbiert wird, so daß diese Wellenlängen nur auf kürzere Entfernungen, insbesondere für den Schiffsverkehr benützt werden. Die Wellenlängen zwischen 1000 und 200 m Länge sind bekanntlich das Hauptgebiet des Rundfunks. Wenn der Abstand vom Sender nicht zu klein ist, gehen sie größtenteils über die Heaviside-Schicht. Die Wellen zwischen 100 und 10 m Länge werden als Kurzwellen bezeichnet. Sie werden mit Richtantennen ausgesandt und gehen vollkommen über die Heaviside-Schicht; dabei werden für den Überseeverkehr die Wellen zwischen 50 und 25 m Länge dann benützt, wenn das ganze von ihnen durchlaufene Gebiet Nacht hat, wenn also nur die obere Heaviside-Schicht in Frage kommt. Die Wellen zwischen 25 bis 19 m Länge werden bevorzugt, wenn zum Teil Nacht, zum Teil Tag herrscht, das Gebiet von 19 bis 14 m, wenn überall Tag ist, wenn also die untere Heaviside-Schicht voll ausgebildet ist und die Fortpflanzung vermitteln kann. Bei den Ultrakurzwellen von 10 bis 1 m Länge kommt nur die vollständig geradlinige Ausbreitung in Frage, weil sie auch von der unteren Heaviside-Schicht nicht mehr reflektiert werden, sondern durch sie durchgehen. Sie können daher nur auf kurze Entfernungen, bis zu einigen hundert Kilometern, benützt werden, spielen aber, wie schon in Kapitel 1 erklärt ist, für den Fernsehverkehr eine Rolle.

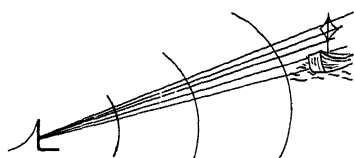



Abb. 7. Funkpeilen

b) Energieübertragung durch Wärmestrahlung

Die ultrarote oder unsichtbare Wärmestrahlung schließt sich in der Wellenlänge an die kurzwellige Seite des Wellenlängengebietes der drahtlosen Tele-

graphie an; auf die kurzwellige Seite des Gebietes der ultraroten Strahlung folgt dann das Gebiet des sichtbaren (optischen) Lichtes, das ebenfalls Wärme übertragen kann, so daß wir unter Wärmestrahlung eine Strahlung im Gebiet der ultraroten wie der sichtbaren Wellenlängen verstehen wollen. Während die Wellenlängen der drahtlosen Telegraphie nur unter Aufwendung beträchtlicher elektrischer Apparaturen erzeugt werden können, werden die Wärmestrahlen von jedem nicht allzu kalten Körper jederzeit ausgesandt, wobei sich der Körper abkühlt, wenn er nicht gleichzeitig von seiner Umgebung Wärmestrahlung erhält oder auf andere Weise erwärmt wird.

Auch bei der Wärmestrahlung ist es nur mit größeren, technisch kaum anwendbaren Hilfsmitteln möglich, die übertragene Energie an bestimmten Punkten zu konzentrieren. Daher verwendet man technisch die Übertragung von Energie durch Wärmestrahlung nur da, wo diese Energie durch große, in der Nähe des aussendenden Körpers gelegene Flächen aufgefangen werden kann und überträgt in allen andern Fällen die Energie durch materielle Träger.

Dennoch wurde alle Energie, die von der Technik benützt wird, einmal als Wärmestrahlung von der Sonne auf die Erde gebracht; dies gilt sowohl für die chemische Energie der Kohlen, die sich aus den in früheren Zeiten der Erdgeschichte unter Ausnützung der Sonnenstrahlung gewachsenen Pflanzen gebildet haben, wie auch für die Wasser- und Windkräfte, welche ihren Ursprung in der Erwärmung von Erde, Meer und Luft durch die Sonne haben. Man kann die Energie, die von der Sonne in einer Sekunde auf einen Quadratzentimeter der Erdoberfläche gestrahlt wird, die sogenannte Solarkonstante, ziemlich genau messen, wobei natürlich der in der Atmosphäre vorher verschluckte Anteil durch Rechnung ermittelt und dazugezählt werden muß; sie beträgt für ein von den Strahlen senkrecht getroffenes Flächenstück 0,0323 Kalorien, d. h. ebenso viele Gramm Wasser könnten durch diese Energie um einen Grad erwärmt werden, oder in andern Einheiten ausgedrückt 0,136 Wattsekunden. Daraus berechnet sich dann die gesamte der Erdscheibe, die ein Kreis von 6372 km Durchmesser ist, von der Sonne zugestrahlte Energieleistung zu $4{,}35 \cdot 10^{13}$ kW. Nun kann man annehmen, daß die Sonne nach allen Seiten gleichmäßig ausstrahlt; da die Entfernung der Erde von der Sonne 149500000 km beträgt, geht die gesamte Sonnenstrahlung in dieser Entfernung durch eine Kugel von diesem Radius, also durch eine Fläche von $149\,500\,000^2 \cdot 4\pi$ qkm. Da wir die durch einen Quadratzentimeter in dieser Entfernung gehende Energie, das ist die Solarkonstante, kennen, vermögen wir auch die gesamte durch die Kugel gehende Energieleistung, die gleich der von der Sonne überhaupt in der Sekunde ausgestrahlten Energie ist, zu berechnen. Sie ergibt sich zu $9 \cdot 10^{25}$ Kalorien in der Sekunde oder $3{,}79 \cdot 10^{23}$ kW. Sie ist so groß, daß sie eine Milliarde Kubikkilometer Wasser in der Sekunde um 90^0 erwärmen könnte. Nur der 10milliardste Teil dieser Energieleistung erreicht die Erde, das übrige wird in die Tiefen des Weltraumes hinausgestrahlt.

Trotz dieser gewaltigen Ausstrahlung kühlt sich die Sonne nicht merklich ab. Wie man heute mit ziemlich großer Sicherheit weiß, wird der bei der Ausstrahlung entstehende Energieverlust dadurch ausgeglichen, daß im Innern der Sonne Materie zerfällt und dafür Strahlungsenergie auftritt, ein Prozeß, den man wie im ersten Kapitel ausgeführt wurde, in letzter Zeit sogar im Laboratorium beobachten konnte. So rührt letzten Endes unsere ganze technisch verbrauchte Energie von diesem Materiezerfall in der Sonne her.

Die von der Sonne auf die Erde gestrahlte Energie wird im allgemeinen erst nach großen Umwegen und an Stellen, an denen schon die Natur für eine Ansammlung gesorgt hat, von der Technik ausgenützt. Dabei geht der weitaus größte Teil für technische Zwecke verloren. Man hat daher schon wiederholt versucht, Sonnenkraftmaschinen zu bauen, in denen durch große Hohlspiegel die Sonnenstrahlung konzentriert und zur Erzeugung von Dampf benützt wird. An sich ist das durchaus möglich; so könnte man in Wüstengegenden der heißen Zone, wo keine sonstigen Energiequellen in erreichbarer Nähe sind, die unmittelbare Energiequelle der Sonnenstrahlung verwerten. Jedoch hat sich bisher gezeigt, daß derartige Anlagen nicht wirtschaftlich sind, da sie zur Konzentration der Energie sehr groß sein müssen und außerdem nur während eines Teils des Tages ausgenützt werden können. Für den Verbrauch in der übrigen Zeit müßte dann die Energie aufgespeichert werden, was bekanntlich stets mit besonders hohen Kosten verbunden ist.

Wo wendet nun die Technik die Energieübertragung durch Wärmestrahlung an? Zunächst zeigt sich, daß schon in der Technik des täglichen Lebens die Wärmestrahlung eine ziemlich große Rolle spielt. So gibt ein Ofen oder Heizkörper, auch wenn er nicht glüht, den größeren Teil seiner Wärme durch Strahlung an die umgebenden Wände des Zimmers ab und nur den kleineren Teil durch Wärmeleitung an die umgebende Luft, die dann die Wärme durch Leitung und in wesentlich stärkerem Maße durch Eigenbewegung (Konvektion) auf das Zimmer verteilt. Im allgemeinen sucht man den ausgestrahlten Anteil der Wärme möglichst klein zu halten, da die Strahlung nur die von ihr unmittelbar getroffenen Stellen erwärmt, also eine ungleichmäßige und darum nicht angenehme Temperaturverteilung herbeiführt. Dazu dient z. B. die Ummauerung des Ofens mit Kacheln, welche die Wärme schlecht leiten und sich deshalb langsam und nicht so hoch erhitzen. Da die ausgestrahlte Wärmemenge stärker mit der Temperatur ansteigt als die durch Leitung übertragene, wird durch ein solches Herunterdrücken der Temperatur der Außenfläche des Ofens auch der Strahlungsanteil vermindert und der Ofen behält dafür seine Wärme länger. Ebenso dient dazu die Unterbringung der Heizkörper der Zentralheizung in der Nähe der Fenster, durch die ja immer etwas Luft strömt; diese strömende Luft beschleunigt die strahlungslose Übertragung der Wärme in das Innere des Zimmers. Auch dann noch wird etwa die Hälfte der ganzen Wärme durch Strahlung abgegeben.

Auch wenn man eine Abkühlung oder Erwärmung verhindern will, muß die Möglichkeit der Aus- oder Einstrahlung beachtet werden. Dies geschieht z. B. bei den wärmeisolierenden Gefäßen, den Thermosflaschen. Hier wird einmal die Wärmeleitung der Wände dadurch sehr klein gehalten, daß eine Doppelwand angeordnet wird, zwischen der die Luft ausgepumpt wird. Um aber weiterhin zu verhindern, daß Strahlung zwischen den beiden Wänden übergeht, werden diese versilbert. Versilbertes Glas bildet einen sehr guten Spiegel, d. h. es wirft fast alles auffallende Licht zurück. Nun weiß man ganz allgemein nach dem Gesetz von Kirchhoff, daß jede Fläche mit hohem Reflexionsvermögen auch ein schwaches Emissionsvermögen für Wärmestrahlung hat, d. h. daß sie einer kälteren Umgebung wenig Wärme zustrahlt und sich daher nur langsam abkühlt. Durch das Verspiegeln der Thermosflaschen wird deshalb sowohl die Einstrahlung wie die Ausstrahlung von Wärme, die beide unerwünscht sind, verhindert.

Stoffe, welche die langwellige Wärmestrahlung durchgehen lassen, nennt man diatherman, Stoffe, welche sie verschlucken, atherman. Glas ist atherman, obgleich es das sichtbare Licht fast ungeschwächt durchläßt. Darauf beruht die Wirkung der Treibhausfenster; sie lassen die Sonnenstrahlen, deren Energie zum größten Teil von den sichtbaren Wellenlängen getragen wird, ungeschwächt einfallen und das Innere des Treibhauses erwärmen, verhindern aber, daß von den erwärmten Teilen eine wieder abkühlende Wärmestrahlung nach außen geht. In kalten Nächten, in denen eine Einstrahlung nicht mehr in Frage kommt, streicht man die Fenster weiß; die weiße Farbe, die ja viel Licht reflektiert, wirkt ähnlich wie die Verspiegelung der Wände der Thermosflaschen und hält auch den letzten Rest von Ausstrahlung zurück.

Man hat in letzter Zeit festgestellt, daß auch die untersten 5 km der Atmosphäre infolge ihres hohen Gehaltes an Wasserdampf als atherman zu betrachten sind und in ganz ähnlicher Weise wirken wie die Treibhausfenster. Wenn die Atmosphäre nicht eine für Wärmestrahlung wenig durchlässige Hülle um die von der Sonne erwärmte Erde bilden würde, so würde die Erde soviel Wärme Wärme ausstrahlen, daß ihre durchschnittliche Temperatur um mindestens 10° tiefer wäre, was natürlich die ganzen Lebensbedingungen vollständig verändern würde.

Während man bei den vorhergehenden Beispielen isolieren will, sucht man eine besonders starke Abkühlung herbeizuführen bei den sogenannten strahlungsgekühlten Röntgenröhren, wie sie bis vor kurzem fast ausschließlich in der medizinischen Therapie und in der Materialdurchleuchtung verwandt wurden. Beim Bau von Röntgenröhren besteht ganz allgemein eine der wichtigsten Aufgaben darin, den weitaus größten Teil der in die Röhren hineingesteckten elektrischen Energieleistung, welche die Größe von einigen Kilowatt erreichen kann, als Wärme abzuführen; denn nur wenige Tausendstel dieser Energie werden als Röntgenstrahlung ausgesandt, während der übrige Teil die auf hohes Vakuum

ausgepumpte Röhre schnell zerstören würde, wenn nicht für eine schnelle Abfuhr gesorgt wäre. In den strahlungsgekühlten Röhren läßt man nun die Antikathode, an deren Oberfläche durch den Aufprall der Kathodenstrahlen die Wärme neben der Röntgenstrahlung erzeugt wird (s. Abb. 8), ruhig sehr heiß, sogar weißglühend werden. Damit sie dies aushalten kann, stellt man sie aus einem massiven Klotz oder einer dicken Scheibe aus Wolfram her, dessen Schmelzpunkt bei 3400° C liegt und das daher ohne zu erweichen, bis über 3000° warm werden kann. Da aber nach dem Stefan-Boltzmannschen Strahlungsgesetz die von einem Körper ausgestrahlte Wärmestrahlungsenergie proportional mit der vierten Potenz seiner absoluten Temperatur zunimmt, strahlt die Antikathode bei 3000° ungefähr 10000mal soviel Wärme aus wie bei Zimmertemperatur (absolute Temperatur etwa 300°). Eine Antikathode, die sich auf 3000° erhitzen kann, braucht deshalb gar nicht besonders groß zu sein, um auch bei Abwesenheit jeder anderen Kühlung einige Kilowatt Energie ausstrahlen zu können, so daß man ihr diese Energie zuführen kann, ohne daß sie sich höher erhitzt und schmilzt. Vorbedingung für diese Strahlungskühlung ist natürlich, daß die Strahlung die Röhre ungehindert verlassen kann. Durch das Glas, aus dem die Wand der älteren Röntgenröhren bestand, ging dies ohne weiteres; es absorbierte von der doch sehr starken Strahlung infolge seiner Durchsichtigkeit so wenig, daß es kaum handwarm wurde. Da man aber zum Schutz vor den Röntgenstrahlen, wie in einem späteren Abschnitt näher ausgeführt wird, heute die Röntgenröhren teilweise aus Metall baut und sie außerdem mit engumschließenden Hüllen umgibt, kann man die Strahlungskühlung meist nicht mehr anwenden, sondern hält durch hindurchgepumptes Wasser oder Öl die Antikathode auf Zimmertemperatur.

Abb. 8. Schema einer Röntgenröhre. Punktiert die Kathodenstrahlen

Abb. 9. Schema eines gewöhnlichen Kessels

Auch bei der Konstruktion von Feuerungen für Dampfkessel hat man in letzter Zeit folgerichtig den Einfluß der Wärmestrahlung berücksichtigt. Früher führte man die bei der Verbrennung entstandenen und dadurch hocherhitzten Gase auf längeren gewundenen Wegen möglichst unmittelbar an den wasserführenden Teilen des Kessels vorbei und ließ so die Wärme vorzugsweise durch Leitung aus den Gasen in das Wasser übergehen. Der Ort der Verbrennung, wo die Gase natürlich am heißesten sind, lag demnach verhältnismäßig weit entfernt von den Stellen, wo Dampf erzeugt wurde. Da die Ausstrahlung infolge des oben erwähnten Stefan-Boltzmannschen Gesetzes mit fallender Temperatur stark abnimmt, strahlen die Gase am Ort der Verbrennung viel mehr aus als später

und diese Ausstrahlung ging früher großenteils an das Mauerwerk, das die Feuerung umgab und war daher als Verlust zu buchen. Heute sucht man nun den Ort der Verbrennung selbst möglichst allseitig mit Wasserrohren zu umgeben, in denen die von den Verbrennungsgasen ausgestrahlte Wärmestrahlung aufgenommen und unmittelbar zur Dampferzeugung verwendet wird. Um möglichst viele Wasserrohre der stärksten Wärmestrahlung aussetzen zu können, wird häufig ein sehr hoher Verbrennungsraum gebaut. Bei reinen Strahlungskesseln kam man so auf eine Dampferzeugung von 100–200 kg Dampf in der Stunde für einen Quadratmeter Heizfläche und auf einen Wirkungsgrad von 80–90%, während man für Kessel, welche die Wärmestrahlung nicht ausnützen, mit 30 bis 50 kg und einem Wirkungsgrad von 70 bis 75% rechnen muß.

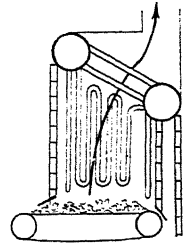



Abb. 10. Schema eines Strahlungskessels

c) Spiegel- und Linsenoptik

Die Mittel zum Richten und Sammeln der Strahlen, die bei der langwelligen Radiostrahlung, wie im ersten Abschnitt beschrieben, nur beschränkt anwendbar und nicht sehr genau sind, konnten für das Gebiet der sichtbaren (und ultravioletten) Lichtstrahlen bis zur höchsten Vollendung ausgebildet werden. Diese Mittel sind die Spiegel und Linsen. Infolge der kleinen Wellenlängen, mit denen wir es jetzt zu tun haben, nehmen diese Vorrichtungen im allgemeinen handliche Abmessungen an und können aus geschliffenem Glas (Spiegel zuweilen auch aus poliertem Metall) hergestellt werden. Andererseits ist die von diesen kurzen Wellen übertragene Energieleistung meist nur klein und auf so hochempfindliche Empfänger, wie sie das Auge und die photographische Platte darstellen, zugeschnitten.

Das Prinzip des Scheinwerfers, bei dem durch einen Hohlspiegel die von einer punktförmigen Lichtquelle nach allen Seiten ausgehenden Strahlen in eine ganz bestimmte Richtung geworfen werden, wurde schon in Abbildung 4 dargestellt. Umgekehrt werden durch ähnliche, allerdings viel flachere Hohlspiegel in den großen Spiegelfernrohren der Astronomie die von einem fernen Stern herkommenden und daher nahezu parallelen Strahlen in einem Punkt vereinigt, wo sie beobachtet oder photographiert werden können. Das Prinzip der Linse des photographischen Apparats zeigt Abbildung 11; die von einem Punkt des Gegenstandes ausgehenden Strahlen werden von der Linse in einem Punkt der Platte gesammelt, so daß von einem entfernten Gegenstand auf der Platte ein verkleinertes Bild entsteht. Umgekehrt ist es bei der Lupe und, wenigstens in großen Zügen, auch beim Mikroskop; hier ent-

Abb. 11. Photographische Linse

steht von einem kleinen, nahe an der Linse gelegenen Gegenstand in größerem Abstand von ihr ein vergrößertes Bild.

Die Fähigkeit der Linsen, ein Strahlenbündel zu sammeln oder zu zerstreuen, rührt bekanntlich davon her, daß jeder einzelne Lichtstrahl, wenn er unter schiefem Winkel auf eine Glasoberfläche trifft, nach Abbildung 12, gebrochen wird, d. h. unter steilerem Winkel im Glas weitergeht. Bei der genauen Berechnung von verwickelten Linsensystemen werden in der Tat einzelne Strahlen auf diese Weise entlang ihres ganzen Weges durch Glas und Luft hindurch zahlenmäßig verfolgt; am Schnittpunkt der verschiedenen Strahlen entsteht dann, wie in Abbildung 11 angedeutet, das Bild.

Abb. 12. Der auf die Glasoberfläche fallende Lichtstrahl wird beim Eintritt ins Glas gebrochen

Die Linsen als Ganzes werden durch einige Größen gekennzeichnet, deren Kenntnis es erlaubt, die Lage und Stärke des Bildes in großen Zügen vorherzusagen. Die wichtigste dieser Größen ist die Brennweite, das ist der Abstand, in dem sich nach Abbildung 13 die von sehr entfernten Punkten kommenden und daher parallelen Strahlen schneiden, in dem daher ein scharfes Bild dieser weit entfernten Punkte entsteht. Das Bild näherliegender Punkte entsteht in einem etwas größeren Abstand. Die Vergrößerung oder Verkleinerung der von der Linse entworfenen Bilder wird ebenfalls von der Brennweite bestimmt; das Verhältnis von Bildgröße zu Gegenstandsgröße ist nämlich gleich dem Verhältnis der Abstände von Bild und Gegenstand von der Linse. Die zweite wichtige Größe, das Öffnungsverhältnis der Linse (häufig auch einfach Lichtstärke genannt), bestimmt die Lichtstrahlenenergie, welche von der Linse gesammelt werden kann. Das Öffnungsverhältnis ist das Verhältnis von Durchmesser und Brennweite der Linse; der Durchmesser ist dabei durch Blenden so einzuschränken, daß auch die äußersten in die Linse fallenden Strahlen noch ein scharfes Bild erzeugen. Wie man an Hand von Abbildung 11 leicht sieht, ist die Zahl der Lichtstrahlen und damit auch die Menge der Lichtenergie, die von einem Gegenstand ausgehend durch die Linse erfaßt wird, um so größer, je größer der Durchmesser der Linse, also die Fläche ist, die sie den Strahlen darbietet. Alle diese Strahlen werden in den Bildpunkten vereinigt. Wie oben erwähnt wurde, ist die Vergrößerung und damit das Bild, das einem Gegenstand entspricht, um so größer, je größer die Brennweite ist; in einem um so größeren Bezirk der photographischen Platte, die wir uns etwa an die Stelle denken, an der das

Abb. 13. Die parallelen Strahlen werden in einem Punkt gesammelt, dessen Abstand von der Linse Brennweite heißt

Bild entsteht, sammeln sich also alle von der Linse aufgefangenen Strahlen. Um so kleiner ist damit die auf einen Quadratzentimeter der Platte fallende Energie und damit auch die photographische Wirkung. Deshalb wird der Linsendurchmesser dividiert durch die Brennweite die Größe sein, welche die Fähigkeit der Linse mißt, möglichst viel von der von einem Gegenstand ausgehenden Lichtenergie zu sammeln, damit man bei gegebener Beleuchtung in möglichst kurzer Belichtungszeit eine genügend belichtete Platte erhält. Bekanntlich kommt man bei käuflichen photographischen Apparaten auf Lichtstärken bis zu 1:1,5. Die größte bisher bei einem Objektiv erreichte Lichtstärke ist 1:0,36; es ist also der Durchmesser des Objektivs etwa dreimal so groß wie die Brennweite. Hierbei handelt es sich allerdings um ein ganz besonderes, für einen astronomischen Spektrographen gebautes System, welches zwischen Hinterlinse und Platte eine Ölimmersion enthält.

Die Erzeugnisse der optischen Industrie werden von jedermann benützt und brauchen daher hier nicht aufgezählt zu werden. Diese besondere Wertarbeit leistende Industrie fußt ganz auf der physikalischen Wissenschaft, und zwar vor allem auf ihrem theoretischen Teil. Jedes optische System wird aufs genaueste durchgerechnet, ehe es auch nur versuchsweise gebaut wird, und vielfach, z. B. bei der Durchbildung des Mikroskops durch Ernst Abbé um das Jahr 1875, waren es ganz neue physikalische Theorien, die zur Verbesserung der optischen Instrumente führten.

2. Die chemische Wirkung der Strahlen

a) Die Photographie

Daß das Licht chemische Veränderungen hervorbringen, chemische Verbindungen aufbauen und zerstören kann, ist schon seit langer Zeit bekannt. So zerstört das Licht viele Farbstoffe, daher bleichen viele Tapeten, Vorhänge usw., wenn sie der Sonne ausgesetzt sind, aus, und erst nach langen Bemühungen der Chemie konnten „lichtechte“ Farbstoffe hergestellt werden. Dies war deshalb so schwierig, weil ja die Farbstoffe ihrer Bestimmung gemäß das auf sie fallende Licht wenigstens zum Teil absorbieren müssen: es mußte also dafür gesorgt werden, daß dieses absorbierte Licht die chemische Bindung der absorbierenden Atome im Molekül nicht zerstört, daß also die absorbierenden Stellen von den bindenden weit entfernt sind. Die Hausfrau benützte die bleichende Wirkung des Lichtes früher zum Bleichen der Wäsche; hierbei wirkt das Licht zunächst nicht zerstörend, sondern aufbauend, indem es aus Wasser, mit dem die Wäsche bekanntlich dabei besprengt werden mußte, und dem Sauerstoff der Luft Wasserstoffperoxyd bildet, das bekannte Bleichmittel, das dann die in der Wäsche enthaltenen Farbstoffe zerstört. Wenn man heute anstatt der Rasenbleiche chemische Mittel, die

Wasserstoffperoxyd entwickeln, verwendet, so ersetzt man die Lichtwirkung durch etwas in diesem Fall genau gleichwertiges.

Während die in den vorhergehenden Abschnitten besprochenen langwelligen Strahlen nur Wärmeenergie oder elektrische Energie übertragen, werden chemische Wirkungen fast ausschließlich von den kurzwelligeren Strahlen, dem sichtbaren, ultravioletten und Röntgenlicht ausgeübt. Dies folgt unmittelbar aus der im ersten Kapitel behandelten Quantennatur der Wellenstrahlung. In den Molekülen der chemischen Verbindungen werden nämlich die Atome durch ihre Elektronen zusammengehalten und jede chemische Reaktion, d. h. jede Umgruppierung dieser Atome muß dadurch eingeleitet werden, daß diese bindenden Elektronen durch Zufuhr von Energie „angeregt", also auf eine höhere Bahn im Atom gebracht oder ganz entfernt werden. Bei den normalen chemischen Reaktionen wirken die von der Temperaturbewegung herrührenden Molekülstöße in dieser Weise anregend; bei den vom Licht beeinflußten Reaktionen genügt die dadurch zu übertragende Energie im allgemeinen zur Anregung nicht, so daß diese Reaktionen durch Erhöhung der Temperatur allein nicht eingeleitet werden können, sondern das Heben der bindenden Elektronen auf eine höhere Bahn muß vom Licht besorgt werden. Ganz ebenso nun wie die im ersten Kapitel beschriebenen lichtelektrischen Elektronen durch langwelliges Licht nicht aus dem Metall ausgelöst werden können, weil die einzelnen Energiequanten dieses Lichtes den für einen solchen einzelnen Vorgang nötigen Energiebetrag unterschreiten und weil bei einem solchen Übergang nicht mehrere Energiequanten zusammenwirken können, können auch die bindenden Elektronen der photochemischen Reaktionen nicht durch langwelliges, sondern nur durch genügend kurzwelliges Licht angeregt werden. Der Betrag eines Energiequants von langwelliger Wärmestrahlung ist ungefähr gleich der mittleren Stoßenergie eines Atoms in einem auf Zimmertemperatur erwärmten Körper; diejenigen Reaktionen, welche schon durch diese Wärmestrahlung angeregt werden könnten, werden also auch durch die Temperaturbewegung allein ausgelöst, so daß hier die Strahlung zu spät kommen würde.

Auch durch Teilchenstrahlung können chemische Reaktionen hervorgerufen werden, wenn nur die Teilchen genügend schnell sind, wenn also ihre kinetische Energie genügend groß ist, um die Anregung besorgen zu können.

Um die bindenden Elektronen anregen zu können, muß das Licht Energie auf sie übertragen, muß also in den reagierenden Stoffen absorbiert werden. In der Tat hat man noch niemals beobachtet, daß irgendwelches Licht, das ungeschwächt durch einen Körper durchging, in diesem chemische Reaktionen hervorgerufen hat. Andererseits wird aber nicht immer die ganze absorbierte Lichtenergie zur Anregung verwandt, sondern ein mehr oder weniger großer Teil davon wird in chemisch nutzlose Wärmeenergie verwandelt.

Es gibt einen ganzen Zweig der physikalischen Chemie, die Photochemie,

der sich damit befaßt, die im einzelnen oft recht verwickelten Verhältnisse bei der Einwirkung des Lichtes auf chemische Reaktionen aufzuklären. In großem Maßstab technisch angewandt wird diese Einwirkung aber nur in einem, allerdings sehr wichtigen Fall; der Photographie. Ihr Kern besteht ja in der chemischen Wirkung des durch die Linse des Apparates geworfenen Lichtes auf die photographische Platte (oder den Film). Die Genauigkeit, mit der die Platte hierbei arbeitet, ist erstaunlich. Z. B. werden zwei im Abstand $^1/_{1000}$ mm auf sie geworfene Lichtstriche noch getrennt wiedergegeben und der Abstand wird unverändert auf beliebig lange Zeiten aufbewahrt. Ganz schwache Lichteindrücke, die mit dem Auge nicht gesehen werden können, werden von der Platte bei genügend langer Expositionszeit innerhalb von Monaten aufsummiert und so festgehalten; umgekehrt kann man bei genügend starker Beleuchtung Momentaufnahmen fliegender Geschosse herstellen, deren Belichtungszeit kleiner als 1 Millionstel Sekunde ist und die daher das fliegende Geschoß fast vollkommen scharf wiedergeben.

Die Einzelheiten der Wirkung des Lichtes auf die photographische Platte sind erst in den letzten Jahren aufgeklärt, d. h. in Zusammenhang mit andern physikalisch-chemischen Erfahrungen gebracht worden. Die über ein Jahrhundert alte technische Entwicklung der Platte hat sich also fast ausschließlich auf Grund von tastenden Versuchen, die großenteils als Fabrikgeheimnis behandelt wurden, abgespielt.

Man stellt sich heute die Art, wie das Licht auf die photographische Platte einwirkt, folgendermaßen vor: Das empfindliche Korn der Platte besteht aus kleinen Bromsilberkristallen. Die Verbindung Bromsilber entsteht aus Silber und Brom dadurch, daß entsprechend der schon in Kapitel 1 erklärten Einwertigkeit dieser beiden Elemente je ein Elektron von einem Silberatom zu einem Bromatom übergeht; man nennt dies eine heteropolare Verbindung. Die Energie des in den Bromsilberkristallen absorbierten Lichtes ist nun imstande, diese sogenannte Ionisierung der Silber- und Bromatome bei einzelnen von ihnen wieder rückgängig zu machen und so einzelne freie Silberatome zu schaffen.

Dabei sind infolge der Temperaturbewegung und anderer Einflüsse nicht alle ionisierten Silberatome des Kristalls im gleichen Zustand anzunehmen; bei einem kleinen Teil von ihnen ist die Bindung sehr locker, so daß sie schon durch Lichtquanten kleiner Energie, also von langwelligem Licht, freigemacht werden können, der größere Teil ist stärker gebunden und erfordert zur Freimachung kurzwelligeres Licht. Bei langwelligem, also nach rot zu liegendem Licht wird die Wahrscheinlichkeit, ein Silberatom zu treffen, dessen Bindungsenergie der Lichtquantengröße angepaßt ist, kleiner sein als bei kurzwelligem, nach blau zu liegendem Licht. Wir müssen daher vom ersteren mehr Quanten einstrahlen, also länger oder stärker belichten als vom letzteren, um dieselbe Zahl von Silberatomen freizumachen. Diese verringerte Empfindlichkeit der Platte gegen rotes Licht ist ja bekannt; sie hat zur Folge, daß Aufnahmen mit normalen Platten

nicht „orthochromatisch" sind, sondern daß rote und grüne Gegenstände weniger hell, blaue heller abgebildet werden, als sie dem Auge erscheinen.

Man kann diesen Fehler beseitigen durch die sogenannte Sensibilisierung der Platten. Auf diese Weise entstehen die ortho- und panchromatischen und die gegen rotes und ultrarotes Licht sogar überempfindlichen Platten. Man färbt dazu die Platten mit einem Farbstoff an, der etwa das rote Licht stark absorbiert; er nimmt also die Energie dieses Lichts auf und kann sie nun unmittelbar an das Bromsilber weitergeben, von dem sie zur Freimachung von Silberatomen benützt wird. Die panchromatischen Platten werden mit Farbstoffen sensibilisiert, die sie für grüngelbes und für rotes Licht empfindlich machen, was für die photographischen Aufnahmen praktisch genügt.

Die durch die Lichtabsorption in der Platte unmittelbar frei gemachten Silberatome bilden das sogenannte latente photographische Bild. Trotz ihrer geringen Menge gelang es in der letzten Zeit, diese Atome sowohl chemisch wie physikalisch nachzuweisen; der letztere Nachweis beruhte darauf, daß die freien Silberatome etwas andere Wellenlängen von durchgestrahltem ultraviolettem Licht absorbieren als die im Bromsilber gebundenen und daß diese Veränderungen im Absorptionsvermögen auch schon bei großen Verdünnungen mit dem Spektrographen gut festzustellen sind.

Bei der nachfolgenden Entwicklung der belichteten Platte setzt nun die äußere chemische Reaktion ein: Diejenigen Silberbromidkörner, in denen genügend viele durch das Licht freigemachte Silberatome vorhanden sind, werden durch den Entwickler (der reduzierende, d. h. Bindungen lösende Eigenschaften hat) vollständig in freies Brom und Silber zerlegt; dagegen vermag der Entwickler die nicht durch Lichtabsorption dafür genügend vorbereiteten Bromsilberkörner nicht anzugreifen. Durchschnittlich genügen, wie man durch Messungen gefunden hat, etwa 300 freigemachte Silberatome, um ein Korn, das fast tausend Milliarden gebundener Silberatome enthält, entwickelbar zu machen. Man nennt diesen Vorgang, bei dem eine chemische Reaktion durch die Anwesenheit kleinster Mengen eines zugesetzten Stoffes eingeleitet wird, Katalyse; wenn der zugesetzte Stoff gleichzeitig das Reaktionsprodukt ist, im besonderen Autokatalyse.

Nun ist das Bromsilber farblos, während die aus freiem, metallischem Silber bestehenden Körner in dem feinverteilten Zustand, in dem sie aus der Entwicklung hervorgehen, schwarz erscheinen; daher werden die vorher belichteten Stellen der Platte bei der Entwicklung schwarz, die Platte zeichnet also die vorher stattgefundene Lichtabsorption getreu auf. Die Schärfe der Zeichnung ist um so größer, je kleiner die Körner sind, andererseits wird dadurch auch die Empfindlichkeit etwas verringert.

Durch das Fixierbad wird nach dem Entwickeln das nicht belichtete und entwickelte Bromsilber aus der Platte herausgelöst. Die für das ganze Verfahren notwendige feine Verteilung des Bromsilbers wird durch Einbetten in Gela-

tine erreicht. Beim Verfolgen von zunächst unerklärlichen Schwankungen in der Güte fabrikmäßig hergestellter Platten hat sich weiterhin gezeigt, daß Schwefelverbindungen, die in Konzentrationen von nahezu eins zu einer Million in der Gelatine enthalten sind, trotz dieser geringen Menge die Empfindlichkeit wesentlich steigern, wahrscheinlich deshalb, weil sich der Schwefel an den Grenzen der Bromsilberkörner mit dem Bromsilber verbinden und die Bindungsfestigkeit des Silbers dabei lockern kann.

Ultraviolette Strahlung wirkt entsprechend ihrer kleinen Wellenlänge besonders stark auf die Platte, wenn man, wie schon in Kapitel 1 erwähnt, eine zu große Absorption in der Gelatine verhindert, ebenso Röntgenstrahlung, soweit sie im Bromsilber absorbiert wird. Auch die meisten Teilchenstrahlungen können photographisch festgehalten werden, wenn sie nur genügend schnell sind.

Von den fast unzählbar vielen Anwendungsgebieten der Photographie soll hier nur der Tonfilm erwähnt werden, in dem die Photographie zur Aufzeichnung und selbsttätigen Wiedergabe von Schallschwingungen dient. Im Mikrophon werden diese Luftschwingungen in Schwankungen eines elektrischen Stromes verwandelt. Dieser Strom speist eine empfindliche Lampe (Abb. 14), deren Helligkeit sich demnach im gleichen Takt wie die Schallschwingungen ändert. Bei einem andern Verfahren wird statt dessen das Licht einer konstant brennenden Lampe durch eine polarisierende Zelle (sogenannte Kerrzelle) geschickt, an welcher der Strom eine Spannung erzeugt, die die Polarisationswirkung der Zelle und damit die Schwächung des Lichtes in der Zelle im Takt der Schallschwingungen ändert. Schließlich dient bei einem dritten Verfahren der Strom dazu, die Größe eines schmalen Spaltes, durch den das Licht geschickt wird, im Takt der Schallschwingungen zu verändern. Dieses in seiner Stärke schwankende Licht wird nun auf einen schmalen Streifen des laufenden Films geworfen und zeichnet dort ein Band auf, dessen Schwärzung sich in Richtung des Filmablaufes ändert und so die Schallschwingungen wiedergibt. Bei der Vorführung des Films wird dann das Licht einer konstant brennenden Lampe durch dieses geschwärzte Band im laufenden Film durchgeschickt und von ihm wieder im Takt der Schallschwingungen geschwächt. Dieses Licht fällt dann auf eine Photozelle, wie sie im ersten Kapitel beschrieben ist, und erzeugt in dieser entsprechend seiner schwankenden Stärke einen schwankenden Strom, der nach Verstärkung in einem Röhrenverstärker im Lautsprecher Schallschwingungen erzeugt, die seinen Schwankungen entsprechen. Dabei ist es sehr wichtig, daß der Film scharf zeichnet: ist doch z. B.

Abb. 14. Schema eines Tonfilmaufnahmeapparates

die Spur einer Schwingung eines hohen Tones auf dem Film nur etwa $^5/_{100}$ mm lang; trotzdem muß auf dieser Länge eine vollständige Schwankung von der größten bis zur kleinsten Schwärzung samt ihren Zwischenwerten enthalten sein.

b) Die chemische Wirkung des Sonnenlichtes

Das weitaus größte Beispiel praktischer Photochemie, das wir bisher kaum verstehen, geschweige denn nachahmen können, gibt uns die Natur in der Assimilation der Kohlensäure durch die grünen Pflanzen unter dem Einfluß des Sonnenlichtes. Die Pflanzen entnehmen aus dem Boden bekanntlich nur Salze, die insbesondere Stickstoff enthalten, und Wasser; die Substanz, aus der sie in der Hauptsache die Fette, Kohlehydrate und Eiweiße ihres Körpers aufbauen, den Kohlenstoff, entnehmen sie aus der Luft, in der er in geringen Mengen in Form von Kohlensäure, herstammend aus der Atmung von Tieren und Menschen und der Zersetzung von Gesteinen usw. vorkommt. Dabei sind besonders bemerkenswert die Energieverhältnisse: Die Kohlensäure ist das Verbrennungsprodukt des Kohlenstoffes, und um diesen in die Form zu bringen, in der er im Körper der Pflanzen zum Aufbau dienen kann, muß er von seiner Bindung an Sauerstoff befreit werden und dazu ist Energie nötig. Diese Energie wird von dem Sonnenlicht geliefert.

In den aus der Kohlensäure, dem Wasser und den Salzen hergestellten Fetten, Kohlehydraten und Eiweißen besitzen somit die Pflanzen einen Vorrat von chemischer Energie, der unmittelbar vom Sonnenlicht stammt. Die genannten Stoffe werden dann im Körper der Pflanzen, ebenso aber auch der Tiere und Menschen, denen sie als ausschließliches Nahrungsmittel dienen, wieder verbrannt, und großenteils in Kohlensäure zurückverwandelt, die bei der Atmung ausgeschieden wird. Die dabei freiwerdende Energie unterhält die ganzen Lebensvorgänge. Aber nicht nur in dieser Weise verwenden wir die in den grünen Pflanzen aufgespeicherte Sonnenenergie. Auch alle Kohlen- und Erdölschätze, die ja das Lebenselement der modernen Industrie bilden, sind die infolge Überdeckung durch luftabschließende Gesteinsschichten erhalten gebliebenen Überreste von Pflanzen (in kleinerer Menge auch von Tieren) aus früheren, Millionen von Jahren zurückliegenden Zeiten der Erdgeschichte. Auch ihre Energie stammt also restlos vom Sonnenlicht.

Im einzelnen weiß man über den chemischen Vorgang bei der Assimilation der Kohlensäure folgendes: Aus einem Molekül Kohlendioxyd (CO_2) und einem Molekül Wasser (H_2O) entsteht durch Zusammenlagerung und Abspaltung eines Moleküls Sauerstoff (O_2) das Formaldehyd (CH_2O), wobei Lichtenergie nötig ist; die Formaldehydmoleküle lagern sich sofort nach ihrer Entstehung zu den Molekülen der Stärke zusammen, die als Kohlehydrat die Formel $(C_6H_{10}O_5)_n$ besitzt. Die Stärke wird aufgespeichert und nach Bedarf in wasserlöslichen Zucker umgewandelt, der dann in Lösung weiterbefördert und weiter umgewandelt

werden kann. Die Bildung des Formaldehyds geht nur in Gegenwart des grünen Pflanzenfarbstoffes Chlorophyll (Blattgrün) vor sich, der vor allem die Aufgabe hat, das zur Energielieferung notwendige Licht aufzunehmen und seine Energie auf die Kohlensäure zu übertragen; die farblose Kohlensäure könnte ja dieses Licht nicht selbst absorbieren. Man hat nun Versuche darüber angestellt, welcher Bruchteil der in Form von Strahlung vom Chlorophyll aufgenommenen Energie zur chemischen Umsetzung verwandt wird, wenn man die Wellenlänge des Lichtes verändert. Es hat sich gezeigt, daß rotes Licht, also Licht sehr großer Wellenlänge, gar nicht wirkt, daß aber bei Verkleinerung der Wellenlänge durch Übergang zu grünem Licht plötzlich eine sehr gute Ausbeute eintritt. Wenn man eine Übersättigung der Chlorophyllmoleküle mit Licht vermeidet, so wird in diesem Wellenlängegebiet fast die ganze aufgenommene Lichtenergie zur Assimilation verwendet. Bei weiterer Verkleinerung der Wellenlänge, also Übergang zu blauem Licht, sinkt aber die Ausbeute wieder, und zwar so, daß sie stets verhältnisgleich mit der Wellenlänge bleibt. Das bedeutet, daß von der Energie des blauen Lichtes nur ein Teil zur chemischen Reaktion verwandt wird, der übrige als Wärme verlorengeht.

Mit Hilfe der Quantenvorstellung sind diese Verhältnisse leicht zu verstehen: Zur Assimilation eines Kohlensäuremoleküls müssen ganz bestimmte Bindungen aufgelöst werden. Und zwar sind es, wie die zahlenmäßige Bestimmung der Ausbeute gezeigt hat, vier einzelne Bindungen, deren genaue Lage im Molekül allerdings noch nicht sicher bekannt ist. Für jede dieser Bindungen braucht man einen ganz bestimmten Energiebetrag, der gleich ist dem Energiebetrag eines Quants von grünem Licht. Wenn ich also rotes Licht einstrahle, so genügt dessen kleinere Quantenenergie nicht zur Lösung der Bindungen, dieses Licht wird daher nicht absorbiert und wirkt nicht. Andererseits wird von der Energie jedes Einzelquants von blauem Licht, die ja größer ist als die von grünem Licht, nur der Teil für die Assimilation verbraucht, der nötig ist, um dieselbe Bindung aufzulösen, der übrige Teil geht verloren, daher sinkt die Energieausbeute bei Übergang von grünem zu blauem Licht. Während also in dem Bromsilber der photographischen Platte, wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben wurde, nebeneinander Bindungen ganz verschiedener Stärke vorliegen, die je nach der Quantengröße des eingestrahlten Lichtes wahlweise angegriffen werden — woraus sich dann die nach Blau zunehmende Empfindlichkeit der photographischen Platte ergibt — haben wir es hier mit Bindungen ganz bestimmter, dem grünen Licht angepaßter Energie zu tun, was die Abnahme der Ausbeute nach Blau zu zur Folge hat. Es ist biologisch sehr merkwürdig, daß diese außerordentlich scharfe Anpassung eine Wellenlänge betrifft, die im Sonnenlicht mit nahezu größter Stärke vertreten ist.

Die geschilderten Versuche wurden alle mit Chlorophyll angestellt, das noch in den Pflanzenblättern selbst eingelagert war. Man kann das Chlorophyll mit

Alkohol leicht aus ihnen herauslösen, dann aber hat es die Fähigkeit zur Assimilation vollständig verloren. Untersuchungen der letzten Zeit haben Andeutungen dafür ergeben, daß das Chlorophyll im Blatt in Form von zwar kleinen, aber doch wohlgeordneten Kristallen vorliegen muß; welche Bindungen sonst noch nötig sind, um es zur Assimilation geeignet zu machen, weiß man heute noch nicht. Nähere Kenntnisse darüber, die natürlich außerordentlich schwierig zu erlangen sind, wären sehr bedeutungsvoll. Die mit sehr guter energetischer Ausbeute, ohne Temperaturerhöhung und ohne Stoffverluste vor sich gehende Kohlensäureassimilation ist ja für unsere chemische Industrie, die bisher stets mit viel gröberen Mitteln, starken Säuren und Laugen, hohen Temperaturen und Drucken und dementsprechend größeren Verlusten arbeitet, ein Vorbild, dem sie in ferner Zeit vielleicht einmal, von der Forschung geleitet, nahekommen kann.

Eine andere chemische Wirkung des Sonnenlichtes, durch die das bekannte antirachitische Vitamin D entsteht, kann man schon heute technisch nachahmen. Dieses Vitamin bildet sich offenbar nur unter dem Einfluß der ultravioletten Sonnenstrahlen im Körper der Tiere und Pflanzen aus dem in Fetten enthaltenen Ergosterin. Durch Bestrahlung z. B. von Milch mit künstlicher Ultraviolettstrahlung werden heute fabrikmäßig Präparate hergestellt, die das Vitamin in erhöhten Mengen enthalten und so zu Heilzwecken verwendbar machen.

c) Atomumwandlung durch Strahlen

Die erste Aufgabe der chemischen Technik, die mit Hilfe systematischer Versuche in Angriff genommen wurde, bestand darin, Elemente ineinander umzuwandeln. Die Alchimisten des Mittelalters, der Renaissance und des Barocks haben diese Aufgabe nicht gelöst; wie im ersten Kapitel dieses Buches ausgeführt wurde, ist es in den letzten Jahren der Strahlungsphysik gelungen, diese Aufgabe im Laboratorium grundsätzlich zu lösen. Hier ist lediglich die Frage zu besprechen, inwiefern die Umwandlung von Atomen technische Bedeutung haben könnte.

Die Mittel, mit denen man diese Umwandlungen herbeiführt, sind Korpuskularstrahlen hoher Geschwindigkeit. Zunächst konnte man zu diesem Zweck nur solche Strahlen benützen, die von den radioaktiven Substanzen ohne unser Zutun freiwillig ausgesandt werden. Da aber diese natürlichen radioaktiven Substanzen sehr selten und teuer sind, und da die von ihnen in der Zeiteinheit ausgesandte Strahlenmenge verhältnismäßig klein ist, konnten mit ihnen auf alle Fälle nur ungeheuer geringe Mengen von Atomen umgewandelt werden, die technisch in keiner Weise in Frage kamen. Eine neue Sachlage entstand, als es gelang, auch durch künstlich erzeugte Strahlen, nämlich durch positive Wasserstoff- und Deuton-Ionen, die in elektrischen Entladungsröhren beschleunigt werden, solche Umwandlungen herbeizuführen. Die dazu nötigen Spannungen betragen einige hunderttausend Volt, die besten Ausbeuten erhält man in der

Gegend von einer Million Volt, das sind Spannungen, die man technisch mit Sicherheit, wenn auch nur mit großen Kosten und nicht ohne Schwierigkeiten, herstellen kann. Es wäre jetzt also grundsätzlich möglich, mit einem genügend großen Aufwand an Apparaten beliebig große Mengen eines Elements umzuwandeln. Aber die Wahrscheinlichkeit, daß ein stoßendes Teilchen gerade auf den Kern eines umzuwandelnden Elements trifft und die Reaktion einleitet, ist immer noch ungeheuer klein, so daß viel zuviele Teilchen mit großen Kosten beschleunigt werden müssen, um ein Atom im gewünschten Sinn umzuwandeln. Man kennt heute noch kein Mittel, um diese Wahrscheinlichkeit in irgendeiner Weise von außen her zu beeinflussen und damit die Ausbeute zu vergrößern. Nur beim Stoß von Neutronen wurde in letzter Zeit ein gewisser Einfluß der Temperatur beobachtet, eine Tatsache, die vielleicht noch weitgehende Folgen zeitigen wird.

Es ist vorläufig aussichtslos, für technische Zwecke irgendwelche Elemente umwandeln zu wollen. Viel größeren Erfolg wird, wie bisher so auch in Zukunft, die Technik haben, wenn sie die leicht erreichbaren Elemente durch die Kunst des Chemikers und Physikers zu neuen Werkstoffen zusammenfügt. So kann man z. B. aus Eisen durch Legierungszusätze und Wärmebehandlungen Edelstähle herstellen, die so wenig angreifbar sind wie Gold oder Platin und diese Edelmetalle für technische Zwecke weitgehend ersetzen können.

Ebenso aussichtslos ist es vorläufig, den bei vielen Atomumwandlungen als Folge eines Massenverlustes eintretenden Energiegewinn technisch ausnutzen zu wollen. Dieser Energiegewinn ist ja nur bei dem einzelnen Stoß zu beobachten; um aber diesen Stoß herbeizuführen, müssen wir infolge der geringen Wahrscheinlichkeit der Kerntreffer so viele Blindstöße einleiten, daß der gesamte Energieaufwand viel größer ist als der Gewinn.

Anders scheint es im Innern der Sonne und der andern Fixsterne zu sein, wo ja eine Temperatur von ungefähr 20 Millionen Grad angenommen wird. Bei diesen hohen, im Laboratorium unerreichbaren Temperaturen besitzen nahezu alle Atome und Elektronen sehr große Geschwindigkeiten; dann aber geht die Energie eines Stoßes, auch wenn dieser keinen Kern trifft, nicht verloren, sondern wird dazu verwandt, ein anderes Atom zu beschleunigen, das dann selbst wieder stoßen kann. Es bleibt also die bei den Massenverlusten der Kernstöße entstehende Energie, auch wenn diese sehr selten sind, weitgehend übrig und kann dann, wie wir in einem vorhergehenden Abschnitt sahen, als Strahlung austreten.

II. Die Strahlen als Untersuchungs- und Kontrollmittel der Technik

1. Das Licht in der Technik

Trotz der immer weiter fortschreitenden Vereinheitlichung und Normalisierung der technischen Einrichtungen können sie auch heute nur angewandt werden, sei es zur Herstellung eines komplizierten Gegenstandes, sei es im täglichen Leben, etwa beim Lenken eines Autos, wenn man das sogenannte „Fingerspitzengefühl" besitzt. Diese dem Bewußtsein schwer zugängliche Eigenschaft wird als Gefühl bezeichnet, weil das Gefühl der Sinn ist, welcher neben dem Geruchssinn am wenigsten unter der Kontrolle des Bewußtseins steht: in Wirklichkeit ist sie natürlich etwas, was durch das Zusammenwirken aller Sinne des Menschen zustande kommt. So spielt z. B. beim Lenken eines Rennwagens das Gehör, welches fast unbewußt den Gang des Motors überwacht, offenbar eine besondere Rolle. In den meisten Fällen aber wird dabei dem Auge die entscheidende Rolle zufallen, weil es bei Menschen mit gutem technischen „Fingerspitzengefühl" imstande sein muß, kleine Unterschiede im Aussehen der Umgebung schnell zu erfassen und Größenverhältnisse richtig abzuschätzen. Man hat nun in den letzten zwanzig Jahren die Entwicklung dieses technischen „Feinsehvermögens" nicht allein dem Zufall oder der persönlichen Arbeit des einzelnen überlassen, sondern bemerkte, daß dabei das physikalische Mittel, mit dem das Auge arbeitet, die Beleuchtung, einen wesentlichen Einfluß hat. Aus dem technischen Zusammenwirken von Physik und Psychologie hat sich so die „Lichttechnik" entwickelt, die schon bisher große Erfolge aufzuweisen hat.

Diese Lichttechnik hat zunächst die Größen festgesetzt, die für die Beleuchtung maßgebend sind und daher in den einzelnen Fällen gemessen werden müssen. Die wichtigsten sind der Gesamtlichtstrom, das ist die gesamte nach allen Seiten von einer Lichtquelle ausgehende Lichtintensität, die Lichtstärke, das ist die in einer bestimmten Richtung innerhalb eines Raumwinkels der Größe eins ausgesandte Lichtintensität; weiterhin die Größe, die für die Beleuchtung, etwa eines Arbeitsplatzes, unmittelbar maßgebend ist, die Beleuchtungsstärke, das ist die auf die Flächeneinheit eines beleuchteten Körpers auffallende Lichtintensität. Die Einheit für die Lichtstärke ist die sogenannte Hefnerkerze, also die Lichtstärke einer in ganz bestimmter Richtung betrachteten, an sich willkürlich gewählten Normallampe. Die Einheit des Lichtstromes, das Lumen, wird so festgesetzt, daß eine Lichtquelle, die nach allen Seiten mit der Lichtstärke einer Hefnerkerze strahlt, den Gesamtlichtstrom von $4\pi = 12{,}5$ Lumen ausstrahlt. Die Einheit der Beleuchtungsstärke ist das Lux (früher Meterkerze genannt), das ist die Beleuchtungsstärke, welche diese Hefnerkerze auf einer in 1 m Abstand stehenden senkrecht

beleuchteten Fläche hervorbringt; anders ausgedrückt, die Beleuchtung, die entsteht, wenn der Lichtstrom eines Lumen auf eine Fläche von 1 qm fällt. Dabei ist zu betonen, daß hierbei stets die Lichtintensität nicht etwa als Energie physikalisch, sondern mit dem Auge als Lichteindruck gemessen wird; sonst hätte man es nicht nötig gehabt, besondere Einheiten dafür aufzustellen.

Da das Licht Energie überträgt, kann man die Zahl der Hefnerkerzen auch in Energieeinheiten, z. B. in Watt, ausdrücken, aber die Zahl der Hefnerkerzen, die einem Watt ausgestrahlter Lichtenergieleistung entspricht, ist nicht für alle Wellenlängen des Lichtes die gleiche. Sie ist am größten für gelbgrünes Licht (Wellenlänge etwa 550 μ), kleiner für blaues und rotes Licht und gleich Null für ultraviolettes Licht. In die Umrechnung zwischen Hefnerkerzen und Watt geht nämlich wesentlich ein die Empfindlichkeit des Auges für die verschiedenen Farben des Lichtes, und diese ist am größten für gelbgrünes, kleiner für rotes und blaues und gleich Null für das unsichtbare ultrarote und ultraviolette Licht. Wir können also unter Verwendung von gelbgrünem Licht mit der kleinsten Energie den Lichteindruck von der Stärke einer Hefnerkerze im Auge erzeugen. Übrigens ist es bemerkenswert, daß das Wellenlängengebiet, für das das menschliche Auge am empfindlichsten ist, ziemlich genau mit dem Gebiet übereinstimmt, das in der Sonnenstrahlung am stärksten vertreten ist.

Nachdem so die Einheiten der zu messenden Größen festgesetzt waren, mußte untersucht werden, welche Beleuchtungsstärken für solche Arbeiten, die besonders von gutem Sehen abhängen, am besten sind. Man kam dabei auf ungefähr folgende Größen: Für den Verkehr in geschlossenen Räumen und auf Straßen soll auf einer etwa einen Meter über dem Boden befindlichen Fläche die Beleuchtungsstärke von 1–2 Lux vorhanden sein. Für starken Verkehr sind mindestens 5–20 Lux zu verlangen. Für grobe Arbeit soll die Arbeitsfläche mit 50–100 Lux, für feinere Arbeit, z. B. Büroarbeit, mit 100–300 Lux, für feinste Arbeit mit 300–1000 Lux beleuchtet werden. Wenn wir also für Büroarbeit den Tisch durch eine in 1 m Abstand über ihm befindliche Glühlampe beleuchten wollen, so muß diese eine Lichtstärke von mindestens 100 Hefnerkerzen nach unten ausstrahlen, somit, wenn kein das Licht nach unten konzentrierender Reflektor vorhanden ist, einen Gesamtlichtstrom von ungefähr $12{,}5 \cdot 100 = 1250$ Lumen aussenden. Wie weiter unten näher ausgeführt wird, geben die besten modernen Glühlampen ungefähr 21 Lumen auf ein Watt elektrischer Stromleistung, so daß wir für diese Tischbeleuchtung mindestens eine Glühbirne von ungefähr 60 Watt benötigen würden. Bei Veränderung des Abstandes nimmt die Beleuchtungsstärke ungefähr umgekehrt proportional mit dem Quadrat des Abstandes zu; wenn wir also die Lichtquelle nur in $^1/_2$ m Abstand von der Tischfläche aufstellen, brauchen wir sie nur $\frac{1}{4}$ so stark zu machen wie in 1 m Abstand. Allerdings wird dadurch die Beleuchtung des umliegenden Raumes stark geschwächt, was meist nicht wünschenswert ist.

Neben diesen Zahlenangaben kam man noch auf andere Erkenntnisse, z. B. erwies es sich als notwendig, Blendung durch zu stark konzentrierte Lichtquellen zu vermeiden, man fand das günstigste Verhältnis der allgemeinen Beleuchtung zu der des unmittelbaren Arbeitsplatzes und ähnliches. Hier ist auch die in letzter Zeit beobachtete Tatsache zu nennen, daß bei schwacher Beleuchtung, wie man sie aus wirtschaftlichen Gründen, z. B. für Autostraßen, wählen muß, einfarbiges, also nur aus einer Wellenlänge bestehendes Licht, wie z. B. das Licht der Natriumdampflampen, bei gleicher Stärke deutlicheres Sehen ermöglicht als weißes, d. h. aus vielen Wellenlängen zusammengesetztes Licht. Diese Tatsache dürfte mit der mangelnden Achromasie des Auges zusammenhängen, die ja zur Folge hat, daß die bei mehrfarbiger Beleuchtung im Auge entstehenden Bilder farbige Ränder besitzen, also nicht ganz scharf eingestellt werden können.

Nachdem so die Anforderungen an eine zuträgliche und für genaues Arbeiten günstige Beleuchtung festgesetzt waren, mußte die Lichttechnik darangehen, diese Forderungen zu verwirklichen, ohne daß dadurch der Wirtschaft zu große Kosten entstanden. Die erste Aufgabe dabei war, den Wirkungsgrad der Lichtquellen zu verbessern, d. h. das Verhältnis zwischen der als sichtbares Licht und der als Wärme ausgestrahlten oder abgeleiteten Energie zu vergrößern. Dieser Wirkungsgrad ist für die meisten Lichtquellen sehr klein, es wird also viel mehr Wärme als Licht erzeugt, das Licht mit verbessertem Wirkungsgrad wird mit einem Schlagwort häufig als „Kaltes Licht“ bezeichnet.

Als Vorbild für einen Mechanismus, der solch kaltes Licht erzeugt, wurde häufig das Glühwürmchen angesehen, bei dem in der Tat trotz des verhältnismäßig starken Leuchtens keine stärkere Erwärmung auftreten kann — schon deshalb nicht, weil das Tierchen daran verbrennen würde. Dieses Leuchten beruht darauf, daß eine chemische Reaktion unmittelbar eine Lichterscheinung hervorruft, eine Tatsache, die auch im Laboratorium in einzelnen Fällen beobachtet wurde und als Chemilumineszenz bezeichnet wird. Bei den meisten chemischen Reaktionen wird ja Energie frei; im allgemeinen wird diese Energie unmittelbar in Wärme umgewandelt und kann dann, wenn sie genügend groß ist, mittelbar die reagierenden oder zugemischten Stoffe zum Glühen erhitzen. Dies ist z. B. der grundsätzliche Vorgang beim Gasglühlicht, wo ja der chemische Vorgang in der Verbrennung des Leuchtgases besteht, welche den Auerstrumpf zum Glühen bringt. Bei den mit Lumineszenz verknüpften chemischen Reaktionen ist es aber anders: Hier vermag die chemische Energie, die ja ursprünglich in den bindenden Elektronen steckt, einen Teil dieser Elektronen auf eine höhere Bahn zu heben, von der sie dann wieder unter Ausstrahlung von Licht „herunterfallen“. Diese Chemilumineszenz ist also genau der umgekehrte Vorgang wie die in einem vorhergehenden Abschnitt beschriebene photochemische Anregung durch eingestrahltes Licht. Nun aber kommt es bei ihr darauf an, daß das ausstrahlende Elektron möglichst ungestört von der höheren auf die tiefere Bahn übergehen kann; jede Störung durch

umliegende Moleküle hat nämlich zur Folge, daß ein Teil der als Licht auszustrahlenden Energie in Wärme übergeht und damit für das Leuchten verloren ist. Um diese Störungen fernzuhalten, müssen die reagierenden Stoffe in möglichst verdünnter Form vorliegen, was wieder zur Folge hat, daß die Leuchtdichte des chemischen Leuchtens immer nur sehr klein ist und daher für technische Zwecke bisher nicht verwendet wurde.

Erfolgreich waren dagegen die Versuche, bei elektrischen Lampen den Wirkungsgrad der Lichtquellen zu verbessern. Schon bei den Glühlampen gelang dies in bedeutendem Maße. Hier dient ja der elektrische Strom lediglich dazu, den Glühdraht zu erhitzen. Nach dem schon in Kapitel 1 kurz erwähnten Planckschen Strahlungsgesetz strahlt nun ein glühender Körper den größten Energiebetrag in einem Wellenlängengebiet aus, das um so kurzwelliger ist, je höher seine Temperatur ist.

Man suchte daher die Temperaturen der Glühfäden möglichst hoch zu halten, um so die am stärksten ausgestrahlten Wellenlängen aus dem langwelligen Wärmestrahlungsgebiet in das kurzwelligere sichtbare zu verlegen. Dieser Temperatursteigerung, die an sich durch Verwendung dünnerer Glühfäden leicht zu erzielen ist, steht aber im Weg, daß dabei der Glühfaden leichter zerstäubt, also eine kürzere Lebensdauer besitzt. Man mußte also zuerst durch Verbesserung der Güte des Wolframmetalls, aus dem die Glühfäden hergestellt werden, und durch Füllung der Glühbirnen mit einem sehr reinen und chemisch nicht reagierenden Gas dieses Zerstäuben herabdrücken, ehe man ohne merkliche Verringerung der Lebensdauer die Temperatur des Glühfadens bis auf ungefähr 2500° steigern konnte. Damit erhält man eine Lichtausbeute von ungefähr 21 Lumen Gesamtlichtstrom, das sind nahezu zwei Hefnerkerzen Lichtstärke auf ein Watt Stromleistung, während man mit den ursprünglichen Glühlampen nur etwa 3 Lumen auf ein Watt bekommen hatte.

Aber auch in diesem Fall werden nur etwa 5 % der ganzen Energie, die vom elektrischen Strom geliefert werden muß, innerhalb des Gebietes der sichtbaren Wellenlängen ausgestrahlt, der übrige als nutzlose oder sogar schädliche langwellige Wärmestrahlung. Wenn wir eine Lampe hätten, welche allein die gelbgrüne Strahlung, für die das Auge am empfindlichsten ist, und keine andere, weder sichtbare noch unsichtbare, ausstrahlt, so würde diese Lampe, wie man aus einem Vergleich von Energiemessungen und mit dem Auge bestimmten Lichtstärken entnehmen kann, eine Ausbeute von 690 Lumen auf ein Watt Energieleistung ergeben. Das würde die Ausbeute des „kältesten" überhaupt möglichen Lichtes sein, also einen Wirkungsgrad von 100 % bedeuten.

Um auch nur in die Nähe dieser hohen Ausbeuten zu kommen, darf man keine erhitzten Körper mehr zur Lichtausstrahlung benützen, sondern man muß die elektrische Energie zur Beschleunigung von Elektronen, also Herstellung von Elektronenstrahlen verwenden. Diese Strahlen treffen auf die Atome eines Gases, bringen dabei einzelne Elektronen dieser Atome auf höhere Quantenbahnen,

und regen sie dadurch zur Lichtaussendung an. Man sucht also die hineingesteckte elektrische Energie möglichst vollständig zur Anregung ganz bestimmter Quantensprünge zu verwenden, die dann ganz bestimmte Lichtquanten, also auch Licht ganz bestimmter Farbe, aussenden. Dagegen erfolgen in einem erhitzten Körper wahllos alle möglichen Anregungen, auch solche, die zu keiner sichtbaren Lichtausstrahlung führen. So wird in den Glimmröhren, wie schon im 1. Kapitel beschrieben, Neon, Quecksilberdampf oder Stickstoff durch stoßende Elektronen zum Leuchten gebracht. Die Ausbeute dieser hauptsächlich wegen ihrer auffallenden Farbe zu Reklamezwecken verwandten Lichtquellen ist noch nicht sehr hoch, außerdem brauchen sie zur Anregung meist so hohe Spannungen, daß sie nicht an das allgemeine Lichtstromnetz gelegt werden können, sondern mit besonderen Hochspannungstransformatoren betrieben werden müssen. Dagegen ist es in letzter Zeit gelungen, Natriumdampflampen zu bauen, die sehr hohe Ausbeuten geben und mit einer Spannung von 220 Volt betrieben werden können; durch eine besondere, automatisch arbeitende Zündeinrichtung muß beim Einschalten der Natriumdampf zunächst erzeugt und der Stromdurchgang eingeleitet werden.

Die Quecksilberdampflampen senden außer sichtbarem Licht besonders starkes Ultraviolettlicht aus. Baut man sie an Stelle von Glas aus Quarz, das diese Strahlung nicht absorbiert, so kann man die austretende Ultraviolettstrahlung als „künstliche Höhensonne" zu Heilzwecken verwenden.

Auch zwei andere technisch benützte Leuchterscheinungen werden durch den Stoß von Elektronenstrahlen angeregt. Bei den Radiumzifferblättern der Uhren usw. senden die dem leuchtenden Belag beigemischten radioaktiven Substanzen schnelle Elektronen (β-Strahlen) aus, welche in der aus kleinen Kristallen bestehenden Hauptmasse des Belages einzelne Metallatome zum Leuchten anregen. Ebenso werden in den zum Beobachten der Röntgenstrahlen dienenden Leuchtschirmen von den absorbierten Röntgenstrahlen durch den in Kapitel 1 beschriebenen Photoeffekt schnelle Elektronen erzeugt, die einen aus Kristallen bestehenden Belag zum Leuchten bringen.

2. Anwendung der ultraroten Strahlen

Die ultraroten Strahlen (manchmal auch als infrarote Strahlen bezeichnet), deren Wellenlänge etwas größer ist als die des sichtbaren roten Lichts, entstehen, wie schon oben besprochen wurde, in großer Menge in jedem erhitzten Körper, also in fast jeder Lichtquelle; sie gehen auch wenig geschwächt durch Glas hindurch (solange ihre Wellenlänge nicht zu groß ist) und können daher leicht erzeugt werden. Weiterhin kann man sie mit Hilfe der besonders dazu sensibilisierten photographischen Platte oder mit einer Photozelle genau so wie das sichtbare Licht aufzeichnen und messen.

Die Unsichtbarkeit dieser Strahlen wird nun besonders bei Sicherungsvor-

richtungen gegen Einbruch ausgenützt. Von einer entsprechend abgestimmten Lichtquelle wird ein Strahl des unsichtbaren Lichtes über den Weg geworfen, den der Eindringling gehen müßte. Auf der andern Seite wird der Strahl von einer Photozelle aufgefangen, dort erzeugt er eine elektrische Spannung, die ihrerseits einen Stromkreis speist. Wird durch den Einbrecher der unsichtbare Lichtstrahl unterbrochen, so hört dieser Strom auf zu fließen, und damit wird eine Alarmeinrichtung ausgelöst.

Da die ultraroten Strahlen nicht zu großer Wellenlänge durch Glas, also auch durch die Linsen der photographischen Apparate noch hindurchgehen, kann man mit ihnen photographieren, wenn man nur ein Filter vorschaltet, welches das sichtbare Licht — wofür die Platte ja sehr empfindlich ist — genügend stark schwächt, und wenn man die Empfindlichkeit der Platte für das ultrarote Licht durch Anfärben mit einem in diesem Gebiet absorbierenden Farbstoff vergrößert. Bekanntlich sind heute schon im Handel Platten für Ultrarotphotographie zu haben.

Man kann so in einem vollständig dunkel erscheinenden Raum, in dem nur ein genügend starker Wärmestrahler vorhanden ist, photographieren. Wenn man diesen Wärmestrahler selbst, etwa ein erhitztes Bügeleisen, aufnimmt, so kann man aus der Aufnahme die Temperaturverteilung an seiner Oberfläche erkennen, die hellsten Stellen sind die heißesten.

In allerletzter Zeit ist es gelungen, das von den unsichtbaren ultraroten Strahlen entworfene Bild unmittelbar sichtbar zu machen. Man läßt es nämlich auf den Leuchtschirm einer Braunschen Röhre (s. Kapitel 1) fallen, in dem es von Elektronenstrahlen beschossen wird, und man konnte Leuchtschirme herstellen, die nur dann aufleuchten, wenn sie gleichzeitig von ultraroten und von Elektronenstrahlen getroffen werden. Dieser „Bildwandler" erzeugt also aus dem ultraroten Bild auf dem Leuchtschirm ein sichtbares Elektronenbild.

Besonders wichtig sind die Ultrarotphotographien von Landschaften deshalb, weil die Ultrarotstrahlen die Atmosphäre besser als die Strahlen des sichtbaren Lichtes durchdringen. Es rührt dies her von dem sogenannten Rayleighschen Streuungsgesetz, nach dem Licht, das durch eine von kleinen Teilchen, wie Staub, Nebeltröpfchen oder auch einzelnen Molekülen erfüllte Atmosphäre durchgeht, an diesen Teilchen gestreut, also von seiner geradlinigen Bahn abgelenkt wird. Diese Streuung ist um so größer, je kleiner die Wellenlänge des Lichtes ist. So werden z. B. von den Staubteilchen und den Molekülen der Luft aus dem Sonnenlicht die kürzesten Wellenlängen, das sind im sichtbaren Gebiet die blauen, am meisten gestreut; infolge dieser Streuung kommen sie nach Abbildung 15 aus Richtungen ins Auge, die nicht unmittelbar zur Sonne führen, scheinen also vom Himmels-

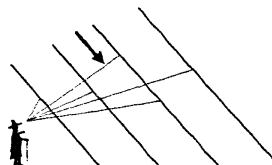



Abb. 15. Die in Richtung des Pfeiles einfallenden Sonnenstrahlen werden in der Luft gestreut

gewölbe selbst herzukommen und lassen dieses somit blau erscheinen. (Dagegen erscheint es bekanntlich in sehr großen Höhen, wo die Luft sehr dünn ist, schwarz.) Wenn wir also von den sichtbaren zu den noch größeren ultraroten Wellenlängen übergehen, wird diese Streuung noch kleiner; das ultrarote Licht vermag also eine mit Dunst erfüllte Atmosphäre besser zu durchdringen als das sichtbare Licht. Wie Versuche gezeigt haben, gilt dies allerdings kaum mehr, wenn die Teilchen des Dunstes so groß sind, daß ein richtiger Nebel vorliegt; gegen feuchten Nebel sind auch die ultraroten Strahlen fast machtlos. Dagegen erzielt man bei normalem Dunst mit Ultrarotaufnahmen ganz bedeutend verbesserte Fernsichten; daher verwendet man z. B. für Fliegeraufnahmen vielfach die Ultrarotphotographie.

3. Chemische Analyse mit optischen Methoden

Während ein glühender Körper Licht- und Wärmestrahlung aussendet, deren Beschaffenheit fast nur von seiner Temperatur, kaum dagegen von seiner chemischen Zusammensetzung abhängt, senden erhitzte oder auch elektrisch angeregte Dämpfe, in denen die Atome mehr oder weniger voneinander isoliert sind, häufig Licht ganz bestimmter Farbe aus. Es hat sich gezeigt, daß diese Farbe jeweils ganz bestimmten, in den Dämpfen vorhandenen Elementen zukommt. So wird bekanntlich eine Flamme durch Kochsalzdämpfe auffallend gelb gefärbt, und zwar stammt dieses gelbe Licht von dem im Kochsalz vorhandenen Natrium. Diese Erscheinung wurde schon frühzeitig zur chemischen Analyse benützt.

Später, im Jahre 1860, wurde von dem Chemiker Bunsen und dem Physiker Kirchhoff der Spektrograph eingeführt. Wie sie fanden, gibt jedes Element im erhitzten Dampf ein ganz bestimmtes Spektrum, also eine ganz bestimmte Kombination einzelner Wellenlängen, an dem man es mit Sicherheit erkennen kann, wenn es sich nur verdampfen läßt. Weiter wurde von ihnen gezeigt, daß die Absorptionslinien eines Elementes mit Emissionslinien zusammenfallen, d. h. daß ein Teil derselben Wellenlängen, die von dem erhitzten Dampf ausgesandt werden, von diesem Dampf absorbiert wird, wenn helleres Licht durch ihn hindurchgeht. Zum Beispiel erscheint im Spektrum eines Lichtbogens, dessen Licht eine mit Kochsalzdampf gesättigte Flamme durchging, eine schwarze Linie genau an der Stelle, an der die oben erwähnte vom erhitzten Kochsalzdampf ausgesandte gelbe Linie liegt. So sind die Fraunhoferschen Linien im Sonnenspektrum zu deuten; sie zeigen, welche Wellenlängen des von der weißglühenden Oberfläche der dichten inneren Sonne ausgesandten Lichtes in der von Dämpfen erfüllten Chromosphäre der Sonne absorbiert wurden und lassen durch Vergleich mit den von irdischen Lichtquellen ausgesandten Wellenlängen ohne weiteres erkennen, welche Elemente in diesen Dämpfen auf der Sonne vorhanden sind.

So gelang es auch, die Anwesenheit bisher unbekannter Elemente an Hand

ihrer Spektrallinien festzustellen: schon von Bunsen und Kirchhoff wurde auf diese Weise das Cäsium und Rubidium gefunden, das erstere wurde nach der blauen, das letztere nach der roten Linie benannt, die ihre Anwesenheit im Spektrum kennzeichnet (cäsius heißt himmelblau, rubidus dunkelrot). Ebenso wurden Thallium, Germanium, Samarium, Indium, Gallium gefunden, und schließlich die Existenz eines neuen Elementes, des Heliums, auf der Sonne festgestellt, das bekanntlich erst später auf der Erde aufgefunden wurde.

Als man dann sehr viele Elemente kannte und festgestellt hatte, daß sie sich in natürlicher Weise auf Grund ihres Atomgewichts und ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften in das periodische System einordnen lassen, veränderte sich die Fragestellung. Es galt jetzt nicht mehr, irgendwelche neuen Elemente aufzufinden, sondern es waren die wenigen noch bestehenden Lücken des periodischen Systems aufzufüllen, also Elemente zu suchen, deren Eigenschaften nahezu vollständig vorherzusagen waren, die aber wahrscheinlich nur in sehr geringen Mengen vorhanden waren. Hier griff eine neue Art von optischer Analyse ein, die Röntgenspektralanalyse.

Die einzelnen Elemente senden ja ebenso wie Licht auch Röntgenstrahlen ganz bestimmter Wellenlängen — die sogenannte charakteristische Röntgenstrahlung — aus, nur müssen sie dazu in viel stärkerer Weise angeregt werden, als dies im glühenden Dampf möglich ist. Man muß dazu die Elemente auf die Antikathoden der Röntgenröhren bringen, wo sie von den Kathodenstrahlen beschossen werden, das sind von der Kathode ausgehende Elektronenstrahlen sehr hoher Geschwindigkeit, die durch Spannungen bis zu 100000 Volt und mehr erzeugt werden. Die aus den Röntgenröhren austretende Röntgenstrahlung wird nicht mit Prismenspektrographen, sondern mit gedrehten Kristallen in ihre einzelnen Wellenlängen zerlegt, aber schließlich erhält man ein Röntgenspektrum der auf der Antikathode befindlichen Substanzen, das ganz ähnlich aussieht, wie das optische Spektrum verdampfter Elemente.

Für die oben erwähnte Fragestellung besteht jedoch ein großer Unterschied: während das optische Spektrum eines Elements sich aus seiner Stellung im periodischen System der Elemente nur in großen Zügen voraussagen läßt, kann man das Röntgenspektrum genau berechnen. Es ist gar nicht abhängig von den speziellen chemischen Eigenschaften des Elements, sondern nur eine sehr einfache Funktion seiner Ordnungszahl. Auch die Anregungsbedingungen wechseln nicht wie im optischen Fall, sondern man weiß genau, mit welcher Spannung die Röntgenröhre betrieben werden muß, damit die Röntgenlinien eines Elements bestimmter Ordnungszahl von diesem ausgesandt werden, wenn es sich nur unter den auf die Antikathode aufgebrachten Substanzen befindet. So fand man im Jahre 1923 das Hafnium, etwas später das Rhenium und Masurium, ebenso, wenn auch nur in Spuren, das Illinium.

In den Industrielaboratorien hat sich die chemische Analyse mit optischen

Methoden in den letzten 20 Jahren in steigendem Maße eingeführt. Eine Zeitlang hat man neben den sichtbaren und ultravioletten Spektren auch die Röntgenspektren anzuwenden gesucht; für den Industriechemiker, der es mit vielfach wiederholten Untersuchungen von Proben ähnlicher Zusammensetzung zu tun und daher Eichsubstanzen in genügender Menge zur Verfügung hat, spielt aber die leichte Vorausberechenbarkeit der Röntgenspektren keine Rolle. Er zieht das in wesentlich kürzerer Zeit und mit weniger umständlichen Mitteln erzeugbare optische oder ultraviolette Spektrum vor, trotzdem es zunächst viel weniger übersichtlich ist.

Nachdem man gelernt hatte, die Elemente im elektrischen Funken oder Lichtbogen unter genau konstantgehaltenen Strombedingungen zu verdampfen und zum Leuchten anzuregen, gelang es auch, quantitative Analysen auf optischem Weg zu machen, d. h. das Mengenverhältnis festzustellen, in dem die einzelnen Elemente des zu untersuchenden Präparates vorhanden sind. Gegenüber der normalen chemischen Analyse, bei der die Elemente durch chemische Reaktionen voneinander getrennt und dann einzeln abgewogen werden, hat das optische Verfahren zwei Vorteile: Es ist vielfach empfindlicher, gestattet also eine Spurensuche, die noch Elemente auffinden und quantitativ bestimmen kann, deren Menge nur $^1/_{1000}$ % der Menge des Gesamtpräparats beträgt. Diese Arbeit ist, wenn einmal die notwendigen Eichungen gemacht sind, in wenigen Minuten zu erledigen, geht also wesentlich schneller vor sich als die meisten chemischen Verfahren.

Die technische Anwendung des Verfahrens erstreckt sich über ein umfangreiches Gebiet: Bei der Suche nach neuen Lagerstätten von technischen Rohstoffen, Erzen usw. arbeiten die Mineralogen und Geologen heute großenteils mit optischen, häufig auch mit röntgenoptischen Analysen. Dabei kommt es darauf an, systematisch ganze Landstriche zu untersuchen, also viele Proben in möglichst kurzer Zeit bestimmen zu können, außerdem auch noch solche Spuren von Elementen nachweisen zu können, die an sich nicht mehr abbauwürdig sind, aber nach ganz bestimmten, in den letzten Jahren aufgefundenen geochemischen Grundsätzen Hinweise darauf geben, ob in der Nachbarschaft reichere Lagerstätten vorhanden sind. Ähnliche Zwecke verfolgt man beim Sortieren von Altmaterial zu neuer Verwendung. Zum Beispiel kann man mit einem geeigneten Handspektrographen einen an den einzelnen Stücken von Stahlschrott mit einfachen Mitteln erzeugten Lichtbogen beobachten und in dem Spektrum mit dem Auge die Linien von Nickel und Chrom erkennen, also die sehr wertvollen nickel- und chromhaltigen Stähle aussondern. Im laufenden Betrieb wird besonders die Reinheit der Werkstoffe mit optischen Verfahren geprüft. Man hat z. B. bei Metallen gefunden, daß ganz geringe Beimengungen die Eigenschaften in gutem oder schlechtem Sinn sehr stark verändern können; für eine von Schwankungen und Störungen freie Erzeugung ist daher eine ständige Kontrolle der Werkstoffe auf die Anwesenheit oder Abwesenheit geringer Beimengungen oft unbedingt nötig.

Schließlich ist die optische Analyse besonders dazu geeignet, den Metallvergiftungen im Betrieb nachzugehen. Bekanntlich führt Quecksilber und Blei zu schweren Vergiftungen, wenn es sich durch dauernde Zufuhr auch in kleinen Mengen im Körper anhäuft; die optische Analyse gestattet es nun, in regelmäßig wiederholten Untersuchungen etwa im Urin die Anwesenheit dieser Metalle festzustellen und damit die gefährdeten Punkte im Betrieb zu ermitteln und zu kontrollieren.

4. Fehlstellenuntersuchung mit Röntgenstrahlen

Die bekannteste Eigenschaft der Röntgenstrahlen ist ihre Fähigkeit, undurchsichtige Körper geradlinig durchdringen und deren inneren Bau sichtbar machen zu können. Nachdem die Physik im Lauf der Jahre erkannt hat, daß in allen, auch den festen Körpern, die mit kompakter Materie erfüllten Raumteile gegenüber den leeren Räumen verschwindend klein sind, hat sich der Standpunkt umgedreht: der Physiker wundert sich nicht mehr darüber, daß die Strahlen die Körper durchdringen, sondern er fragt nach den Gesetzen und Kräften, welche die Absorption der doch so gut wie immer durch die Lücken des atomistischen Aufbaus der Körper durchgehenden Strahlen — und damit die mehr oder weniger große Undurchsichtigkeit — im einzelnen Fall bestimmen.

Auch für die technische Anwendung der Strahlen zur Durchleuchtung von Körpern ist dieser Standpunkt wichtig. Wenn man die inneren Verhältnisse im durchstrahlten Körper erkennen will, so müssen die Strahlen zum Teil in dem Körper absorbiert werden, in den Hohlräumen aber weniger stark. Wenn die Strahlen in der Materie nur sehr wenig absorbiert werden, also fast ungeschwächt durch alles durchgehen, wie es z. B. für die kosmische Höhenstrahlung zutrifft, so können auch keine Schattenbilder des Inneren der Körper durch sie sichtbar gemacht werden.

Während nun für sichtbares und ultraviolettes Licht der Grad der Durchsichtigkeit eines Stoffes von speziellen, fast zufälligen Einzelheiten des Zustandes abhängt, ist die Schwächung der Röntgenstrahlen beim Durchgang durch einen Stoff von gegebener Zusammensetzung leicht zu berechnen: Die Schwächung ist um so größer, d. h. die Durchsichtigkeit des Stoffes um so kleiner, je größer die Dichte und das Atomgewicht des Stoffes und je größer die Wellenlänge der Röntgenstrahlung, d. h. je kleiner die Spannung an der zu ihrer Erzeugung verwandten Röhre ist. Nun ist die Dichte und das Atomgewicht der technischen Werkstoffe, z. B. von Eisen, viel größer als mittlere Dichte und Atomgewicht des großenteils aus Wasser und Kohlenstoff zusammengesetzten menschlichen Körpers; daher braucht man zur technischen Röntgendurchstrahlung meistens viel höhere Spannungen als zur medizinischen Diagnostik, nämlich Spannungen, die in der Größenordnung der in der medizinischen Therapie üblichen (200000 Volt) liegen und öfters sogar darüber hinausgehen. So werden in der Industrie heute schon

Spannungen bis 300000 Volt benützt; damit bekommt man von Eisenstücken bis zu 12 cm Dicke in nicht allzu langen Belichtungszeiten Durchstrahlungsaufnahmen, auf denen bei guter Ausführung Risse, Gußblasen usw., welche die Festigkeit des Werkstücks bedrohen, zu sehen sind. Kleinere Dicken erfordern natürlich geringere Spannungen; häufig kann dann auch die Stärke der durch das Werkstück durchgegangenen Röntgenstrahlung so gesteigert werden, daß man sie mit dem Leuchtschirm genügend deutlich sichtbar machen und so die Untersuchung am Leuchtschirm ohne Aufnahme ausführen kann. Das ist natürlich für den laufenden Betrieb besonders vorteilhaft und konnte durch eine bedeutende Verbesserung der Leuchtschirme in den letzten Jahren sehr erleichtert werden.

In der Industrie ist es meist nicht möglich, die Röntgenröhren so weit vom übrigen Betrieb abzusondern, daß nur besonders geschulte Leute in ihre Nähe kommen; daher ist hier der Strahlen- und Hochspannungsschutz sehr wichtig. Es muß also dafür gesorgt werden, daß die mit den Apparaten arbeitenden, sowie andere in der Nähe befindliche Leute niemals von Strahlen getroffen werden, auch nicht von den kleinen Mengen, die durch Streuung der auf das Werkstück oder die Wände auftreffenden ursprünglichen Strahlen entstehen. Dies wurde in hohem Maß erleichtert durch die Entwicklung der sogenannten Strahlenschutzröhren, die heute fast ausschließlich gebraucht werden. Es sind das Röntgenröhren, die nur noch zum Teil aus Glas, im übrigen aber aus Metall bestehen; diese Metallteile umhüllen die Stellen, an denen die Strahlung entsteht, fast vollständig und lassen nur ein Strahlenbündel von einer dem zu durchstrahlenden Werkstück angepaßten Größe austreten. Bei den früheren aus Glas bestehenden Röhren konnte sich die Strahlung fast ungehindert nach allen Seiten ausbreiten und mußte dann in größerer Entfernung von der Röhre durch umfangreiche Bleiwände aufgefangen werden. Bei Verwendung der Strahlenschutzröhren braucht man nur noch eine kleine Bleiwand, welche die vom Werkstück ausgehende Streustrahlung vom Beobachter abhält. Selbstverständlich muß die durch den Leuchtschirm durchgehende Strahlung ebenfalls vom Beobachter ferngehalten werden; dazu verwendet man eine hinter dem Leuchtschirm angeordnete Scheibe aus stark bleihaltigem und daher die Röntgenstrahlen absorbierendem Glas, wenn man es nicht vorzieht, den Leuchtschirm durch einen schräg gestellten Spiegel von der Seite her zu betrachten.

Der Hochspannungsschutz muß erstens die Berührung hochspannungsführender Teile durch Personen verhindern; zweitens ist er aber dringend nötig, um Überschläge zum Werkstück und damit Schädigungen der Apparate zu vermeiden, wenn es sich um die Untersuchung größerer Werkstücke, wie Brückenträger, Kessel usw. handelt. Hierzu muß die Röntgenröhre an das zu untersuchende Werkstück herangebracht werden, bei Kesseln ist es sogar häufig zweckmäßig, sie in den Kessel hineinzubringen und die Kesselwand von innen nach außen zu durchstrahlen. Das läßt sich betriebsmäßig nur erreichen, wenn die Röhre und die Zuleitungen zu ihr

keinerlei freie hochspannungsführende Oberfläche besitzt, also durch geerdete Teile vollständig abgekapselt ist. So hat man Kabel entwickelt, die außen eine geerdete Metallhülle besitzen und im Innern, durch Gummi isoliert, eine Hochspannung von mehr als 100000 Volt führen können. Die Röntgenröhre wird gegenüber ihrer geerdeten Außenhülle meist durch Öl isoliert, das zur Kühlung mit einer Pumpe in Umlauf gesetzt wird. Nach Überwindung beträchtlicher Schwierigkeiten gelang es, die elektrische Isolation durch Gummi und durch Öl so wirkungsvoll zu gestalten, daß heute eine Röhre für 200000 Volt Spannung mit ihrer geerdeten Schutzhülle und ihren Hochspannungskabeln ein verhältnismäßig wenig umfangreiches und leicht bewegliches Gerät geworden ist. Ebenso hat man auch die zur Erzeugung der Hochspannung nötigen Transformatoren transportabel gestaltet, so daß man heute ohne Schwierigkeit an jede zu untersuchende Stelle herankommen kann. Die Röntgenröhre ist aus einer physikalischen Apparatur in den Händen der Techniker zu einer Maschine geworden, allerdings hat schon Röntgen selbst gelegentlich seine Röhren unter Öl gesetzt, um höhere Spannung an sie legen zu können.

Für sehr dicke Stücke oder für solche Werkstoffe, die Elemente von hohem Atomgewicht in größerer Menge enthalten und daher stark absorbieren, hat man anstatt der Röntgenstrahlen, die in solchen Fällen mit sehr hoher und kostspieliger Spannung erzeugt werden müßten, auch die γ-Strahlen von radioaktiven Substanzen zur Fehlstellenuntersuchung verwendet. Die Aufnahmetechnik ist sehr einfach: Man bringt das in einem kleinen Röhrchen befindliche radioaktive Präparat auf die eine Seite des zu durchleuchtenden Werkstücks, die photographische Platte (die am besten noch mit einem Verstärkerschirm hinterlegt wird, d. h. mit einem Leuchtschirm, dessen Licht ebenfalls auf die Platte wirkt und der somit die durch die Platte durchgegangene Strahlung ausnützt) auf die andere Seite. Der Nachteil gegenüber den Röntgenstrahlen besteht darin, daß die Aufnahmezeiten einige Stunden betragen und daß infolge der schon fast zu großen Durchdringungsfähigkeit der γ-Strahlen, die ja in ihrer Wellenlänge nicht abgestuft werden können, die Fehler oft weniger deutlich erkennbar sind als bei einer für das betreffende Werkstück gerade richtig ausgewählten Röntgenstrahlung. Doch wird in einzelnen Fällen die γ-Durchstrahlung mit gutem Erfolg angewandt.

Mit den im vorhergehenden beschriebenen Mitteln kann man alle Werkstücke ohne besondere Schwierigkeiten durchstrahlen. Will man das Verfahren zur Untersuchung eines bestimmten Falles anwenden, so hat man nur zu fragen, ob es die hierbei die Festigkeit beeinträchtigenden Baufehler zu erkennen gestattet und ob seine Kosten im Verhältnis zu dem Preis des ganzen Werkstücks nicht zu hoch sind. Die letztere Frage spielt häufig bei dickeren Stücken eine Rolle, bei denen man nicht mehr mit dem Leuchtschirm arbeiten kann, sondern photographieren muß, was insbesondere Arbeitszeit verbraucht und Röhrenkosten verursacht. Man wird daher häufig die Röntgendurchleuchtung auf lebenswichtige

Teile einer Konstruktion beschränken, bei deren Versagen ein Schaden entstehen würde, der in keinem Verhältnis mehr zu den Durchstrahlungskosten steht. Bei solchen Teilen kommt es dann ganz besonders auf die Sicherheit des Verfahrens an, also auf die Frage, ob man tatsächlich aus den im Röntgenbild sichtbaren Fehlern auf die Festigkeit des Werkstücks schließen kann, so daß man keine diese heruntersetzenden Fehler übersieht und andererseits nicht zu viele Stücke ausscheidet wegen kleinerer Fehler, die ohne wesentlichen Einfluß sind. Diese Frage kann nur durch größere Versuchsreihen an vielen gleichartigen Werkstücken entschieden werden, bei denen Durchstrahlung und Festigkeitsuntersuchung parallel gehen. Da sich das Röntgenverfahren erst seit etwa fünf Jahren in größerem Umfang in der Industrie eingebürgert hat, sind diese vergleichenden Untersuchungen noch keineswegs vollständig durchgeführt. Ihr bisheriges Ergebnis läßt sich etwa in folgender Weise zusammenfassen: Bei allen Teilen, die unmittelbar aus dem Schmelzfluß erstarrt sind, läßt eine gut ausgeführte Röntgenuntersuchung alle die Festigkeit bedrohenden Fehler erkennen; bei Teilen dagegen, die nach der Erstarrung noch verformt, d. h. geschmiedet, gewalzt, gezogen oder gehämmert wurden, können die Löcher, Risse und Sprünge so stark zusammengedrückt sein, daß man sie manchmal auf dem Röntgenbild nicht mehr sieht, trotzdem sie die Festigkeit wesentlich beeinflussen.

Abb. 16. Durchschnitt durch eine geschweißte Platte mit Fehlern und Anordnung zur Röntgenaufnahme

Besonders wichtig war die Röntgendurchstrahlung für die Entwicklung der Schweißverfahren in den letzten Jahren. Man führt ja heute viele Verbindungen von Konstruktionsteilen statt durch Nieten und Schrauben durch Schweißen, also durch Ausgießen der Fugen mit flüssigem Metall, aus, weil dabei an Gewicht und an Herstellungskosten gespart wird. Da aber die Festigkeit der Schweißverbindung beträchtlich von der Geschicklichkeit des Schweißers und von sonstigen Umständen bei der Herstellung abhängen kann, ist es oft unbedingt nötig, die Güte der Schweißung nachzuprüfen. Die zuerst ausgeführten Röntgendurchstrahlungen solcher Schweißnähte ließen nun häufig größere und kleinere Blasen im flüssig gewesenen Material erkennen. Gleichzeitige Festigkeitsuntersuchungen zeigten aber, daß diese auffallenden Fehler keine starke Schwächung der Festigkeit zur Folge hatte, weil ohnedies genügend Material vorhanden ist. Dagegen erwies sich der sogenannte Bindungsfehler als besonders schädlich; wie Abbildung 16 zeigt, haftet hierbei das geschmolzene Material nicht an den zu verbindenden Teilen. Es gelang nun bald, auch diesen Bindungsfehler auf den Röntgendurchstrahlungsaufnahmen als feinen schwarzen Strich, etwa wie in Abbildung 17 zu erkennen. Schließlich treten manchmal noch, hauptsächlich bei ausgedehnten Konstruktionsteilen, z. B. geschweißten Eisenträgern, infolge der

ungleichmäßigen Wärmeausdehnung in der Nähe der Schweißstelle Risse auf, die in ähnlicher Weise zu erkennen sind. Von vielen Stellen, die laufend Schweißungen ausführen, z. B. an Lokomotivteilen oder eisernen Baukonstruktionen, werden heute sämtliche Schweißstellen mit Röntgendurchstrahlungsaufnahmen nachgeprüft.

Die Fehlstellenuntersuchung mit Röntgenstrahlen hat den Anstoß dazu gegeben, sich überhaupt mit der Möglichkeit zerstörungsfreier Prüfverfahren näher zu beschäftigen. Bis vor wenigen Jahren konnte man die inneren Eigenschaften eines fertigen Konstruktionsteils nur an Stichproben untersuchen, die dann von der weiteren Verwendung ausgeschlossen wurden. Diese Stichproben wurden dann z. B. in der Zerreißmaschine zerrissen, und aus der dazu nötigen Spannung auf die Festigkeit des Materials geschlossen. Bei größeren wichtigen Gußstücken wurde ein solcher Zerreißstab mit angegossen, um sicher zu sein, daß auch der einzelne Guß fehlerfrei ausgefallen war. Sobald aber das Herstellungsverfahren von schlecht kontrollierbaren Umständen stark abhängt und dadurch die Güte des hergestellten Gegenstandes starken Schwankungen unterworfen ist, vermindert sich die Sicherheit, mit der aus einzelnen Stichproben die Güte der ganzen Herstellungsserie geschlossen werden kann. Die zerstörungsfreien Prüfverfahren sollen es ermöglichen, jedes einzelne Stück, bevor es der endgültigen Verwendung zugeführt wird, auf seine für die verlangte Festigkeit maßgebenden Eigenschaften hin zu untersuchen, ohne daß es dadurch in Mitleidenschaft gezogen wird. Außer dem Röntgenverfahren wird für Eisen- und Stahlteile besonders auch das magnetische Verfahren angewandt. Es besteht darin, daß das zu untersuchende Stück magnetisiert und mit einem sehr feinen, in Öl aufgeschlämmten Eisenpulver bestrichen wird. Die magnetischen Kraftlinien treten zum Teil aus der Oberfläche des Stückes heraus; wo sie besonders dicht sind, sammelt sich das Eisenpulver an. Es hat sich nun gezeigt, daß an den Stellen, an denen in der Nähe der Oberfläche Risse und ähnliches verlaufen, die Kraftlinien verdichtet werden, so daß man den Verlauf dieser Risse, auch wenn sie an der Oberfläche nicht herauskommen, an einer Ansammlung des Eisenpulvers erkennen kann. Man kann mit dieser Methode noch Risse feststellen, die so dünn sind, daß sie auf den Röntgenaufnahmen nicht zu sehen sind, andererseits kann das Röntgenverfahren bis in größere Tiefen vordringen, und gestattet ein besseres Urteil über die genaue Beschaffenheit der Fehlstellen.

Abb. 17. Das bei der Anordnung der Abb. 16 entstehende Röntgenbild. Es zeigt Poren und Bindungsfehler

Überall da, wo das magnetische oder ein sonstiges, mit elektrischer oder ähnlicher Anzeige arbeitendes Verfahren ebenso deutliche Ergebnisse wie das Röntgenverfahren gibt, wird man das letztere verlassen, da es verhältnismäßig kost-

spielige Apparate erfordert und meist zeitraubend ist. Allerdings ist es trotz der vielfachen Bemühungen in dieser Richtung nur in wenigen Fällen gelungen, das Röntgendurchstrahlungsverfahren bei der zerstörungsfreien Prüfung zu ersetzen.

5. Kristalluntersuchung mit Röntgenstrahlen

Die schon in Kapitel 1 beschriebenen, von Max v. Laue zusammen mit Friedrich und Knipping entdeckten Interferenzen der Röntgenstrahlen an Kristallen haben auch für die Werkstoffuntersuchung ganz neue Wege eröffnet. Als man nämlich alle möglichen festen Stoffe, wie Metalle und ihre Legierungen, Gesteine, aber auch organische Stoffe wie Textilfasern und Holz, den Röntgenstrahlen aussetzte und nach solchen Interferenzen suchte, fand man sie in jedem Fall außer bei den Gläsern, die sich auch in anderen Eigenschaften nur wenig von den Flüssigkeiten unterscheiden. Alle diese festen Stoffe bestehen somit aus Kristallen; allerdings handelt es sich dabei meistens nicht um einzelne, durch ihre regelmäßige äußere Form schon als solche gekennzeichnete Kristalle, wie man sie in den mineralogischen Sammlungen findet und wie sie auch bei den ursprünglichen Interferenzversuchen benützt wurden, sondern um sehr kleine, äußerlich unregelmäßig begrenzte und zusammengebackene Kriställchen, die man in vielen Fällen nicht einmal mit dem Mikroskop einzeln sehen kann. Die Rönteninterferenzen zeigen genau, daß in jedem dieser Kriställchen die Atome in regelmäßiger Weise in einem „Raumgitter“ angeordnet sind, wie es in Kapitel 1 dargestellt wurde. Sie erlauben aber auch in den meisten Fällen, die Abstände der Atome in diesem Gitter mit großer Genauigkeit auszumessen.

Abb. 18. Anordnung zur Aufnahme nach Debye und Scherrer. Rechts der kreisförmig gebogene Film, in dessen Mitte das Präparat

Zur Untersuchung dieser vielkristallinen Stoffe wird eine zuerst von Debye und Scherrer angegebene Abänderung des ursprünglichen Laueschen Verfahrens benützt, bei dem statt der dort auftretenden einzelnen Punkte ringförmige Linien auf dem Film entstehen, die man meist Debyelinien nennt (s. Kapitel 1). Die dabei gebrauchte Anordnung ist in Abbildung 18 dargestellt: Aus der Röntgenröhre muß eine monochromatische, d. h. eine möglichst nur eine einzige Wellenlänge enthaltende Röntgenstrahlung austreten; durch zwei Blenden wird davon ein feiner Strahl abgegrenzt, der auf das zu untersuchende, meist in Form eines dünnen Stäbchens aufgestellte Präparat fällt. Von diesem gehen dann nach der Seite die Interferenzstrahlen ab, die auf dem meistens kreisförmig gebogenen photographischen Film die Debyelinien erzeugen. Die monochromatische Strahlung wird meist dadurch hergestellt, daß in die Röntgenröhre statt der in der medizinischen Anwendung und bei der Fehlstellenuntersuchung üblichen Antikathoden aus Wolfram solche aus Kupfer eingebaut werden und

die Röhren mit einer Spannung von ungefähr 30000 Volt, also mit Röntgendiagnostik-Apparaten betrieben werden. Dann tritt aus der Röhre fast ausschließlich die aus nur zwei einzelnen Wellenlängen bestehende sogenannte charakteristische Eigenstrahlung des Kupfers aus, das ist das von den Quantenbahnen des Kupferatoms im Röntgengebiet erzeugte Spektrum (während bei Wolframantikathoden neben der Eigenstrahlung des Wolframs die aus vielen Wellenlängen bestehenden also annähernd „weißes Röntgenlicht" darstellende sogenannte Bremsstrahlung sich stark bemerkbar macht). Die so entstehende Strahlung ist sehr weich d. h. leicht absorbierbar (sie hat ungefähr die Wellenlänge der in der Hauttherapie benützten sogenannten Grenzstrahlen), und würde daher im gewöhnlichen Röhrenglas zu stark geschwächt werden; deshalb werden die Röhren mit Fenstern aus leichtdurchlässigem Glas versehen. Die zur Herstellung deutlicher Interferenzringe notwendige Belichtungszeit beträgt einige Minuten bis einige Stunden. Wie für die technische Röntgendurchstrahlung, so gibt es auch für die Interferenzuntersuchung käufliche besonders konstruierte Apparate, Röhren und Aufnahmekammern, die neben den medizinischen Röntgenapparaten hergestellt werden und in letzter Zeit guten Absatz in wissenschaftlichen Laboratorien und in der Industrie fanden.

Ein grundsätzlicher Vorteil des Verfahrens besteht darin, daß man die Stoffe unmittelbar in dem Zustand untersuchen kann, in dem sie etwa in einem Werkstück vorliegen, während man namentlich bei den chemischen Untersuchungen sie vorher in Lösung bringen oder sonstwie aufschließen muß, wobei häufig schwer kontrollierbare Veränderungen eintreten.

Bei den Tausenden von Röntgeninterferenzaufnahmen, die seit dem Jahr 1912 gemacht wurden, hat sich nun gezeigt, daß jeder chemischen Verbindung und jeder Modifikation einer solchen ein ganz bestimmtes, besonderes Raumgitter zukommt, somit jede chemische Verbindung ihr eigenes, durch eine besondere Kombination von Linien von anderen unterscheidbares Debye-Scherrer-Diagramm besitzt. Man kann somit in einem vorgelegten Präparat die An- oder Abwesenheit aller Verbindungen erkennen, von denen man sich Musteraufnahmen hergestellt hat. Dies ist z. B. für die Erforschung von Legierungen wichtig, in denen ja häufig mehrere Verbindungen der legierten Metalle nebeneinander vorkommen. Man kann diese Verbindungen zwar meist auch im Mikroskop nebeneinander sehen, aber oft nicht deutlich voneinander unterscheiden, so daß hier das Röntgenverfahren die mikroskopische Untersuchung gut ergänzt. Mit einigen Vorsichtsmaßnahmen kann man auch aus dem Stärkeverhältnis der zu zwei in einem Präparat vorhandenen Verbindungen gehörenden Debyelinien ihr Mengenverhältnis berechnen, eine Aufgabe, die wesentlich über die gewöhnliche Elementaranalyse hinausgeht.

Durch eine mathematische Auswertung der Diagramme, ausgehend von den Winkeln, unter denen die Interferenzstrahlen vom Präparat ausgehen, findet man dann in einer meistens ganz eindeutigen und sicheren Rechnung die gegen-

seitige Lage und die Abstände der einzelnen Atome in den Kristallgittern. Vielfach haben sich dabei jene Vorstellungen vom Bau der Moleküle bestätigt, die sich die Chemie schon lange vorher auf Grund ihrer eigenen Untersuchungsverfahren gebildet hatte. Zum Beispiel fand man, daß im Diamanten jedes Kohlenstoffatom von vier anderen Kohlenstoffatomen in gleichem Abstand umgeben ist, während die Chemie schon lange wußte, daß ein Kohlenstoffatom gerade vier andere an sich zu binden vermag. Weiter ergaben die Röntgenuntersuchungen, daß im kristallisierten Benzol die Kohlenstoffatome regelmäßige, deutlich voneinander getrennte Sechsecke bilden; man fand also das Benzolmolekül in der Gestalt wieder, in der es seit langen Jahren die Grundlage der organischen Chemie gebildet hatte. Bei Stoffgruppen dagegen, die sich nicht unzersetzt in Lösung bringen oder verdampfen lassen und die deshalb von der Chemie nicht unmittelbar untersucht werden konnten, z. B. den Silikaten oder den Legierungen, aber auch den Textilfasern und den Eiweißen, brachte die Röntgenuntersuchung ganz neue Erkenntnisse.

Für die Silikate fand man erst auf Grund der Röntgenuntersuchung durch W. L. Bragg eine natürliche Einteilung, die sehr dem System von Strukturbildern ähnelt, mit dem die organische Chemie so große wissenschaftliche und technische Erfolge hatte.

Bei den Metallen konnten die einzelnen Modifikationen deutlich unterschieden werden; z. B. hat das Eisen bei normalen Temperaturen ein Raumgitter, in dem jedes Atom von acht andern in gleichem Abstand umgeben ist, geht aber oberhalb 700° in eine andere Modifikation über, in der jedes Atom von zwölf anderen umgeben ist. Will man Stahl härten, so muß man ihn von Temperaturen oberhalb 700° in Wasser abschrecken; dabei geht das letztere Gitter in das erstere über. Hauptsächlich infolge des im Gitter noch eingelagerten Kohlenstoffs, der bei tiefen Temperaturen das Bestreben hat, aus dem Gitter auszutreten, aber infolge des schnellen Abkühlens keine Zeit dazu findet, entstehen bei diesem Übergang Zwangszustände, welche die Härtesteigerung verursachen. Bei langsamem Abkühlen kann der Kohlenstoff das Gitter des Eisens verlassen, während sich das Material noch auf erhöhter Temperatur befindet, dann tritt keine stärkere Härtung ein. Bei den in Legierungen häufig enthaltenen Verbindungen zweier oder mehrerer Metalle miteinander konnte auf Grund ihres Raumgitters festgestellt werden, welche von ihnen gleichartig gebaut sind und welche nicht.

Man kann auf dieser Grundlage z. B. allgemein übersehen, welche Metalle in einer Legierung sich gegenseitig ersetzen können, ohne daß sich die Eigenschaften der Legierung wesentlich verändern, eine Frage, die natürlich besonders dringend wird, wenn einzelne Metalle aus volkswirtschaftlichen Gründen gespart werden müssen. Allerdings hat sich gezeigt, daß durchaus nicht alle Eigenschaften in solchen Legierungen miteinander parallel gehen; wie im reinen Zustand so auch als Legierungsbildner verhalten sich zwar in groben Zügen viele Metalle einander

ähnlich, zeigen aber bei feinerer Betrachtung ganz charakteristische Unterschiede. Ähnlich ist es bei den Kristallgittern der Legierungen; auch diese sind vielfach einander nahezu gleich, unterscheiden sich aber durch kleine Umlagerungen der verschiedenartigen in ihnen enthaltenen Atome, bei denen manche Eigenschaften gar nicht, andere, wie z. B. der Magnetismus, ganz wesentlich geändert werden. So kann man zur Lösung der Aufgabe, gesetzmäßige Zusammenhänge zwischen Zusammensetzung und Kristallstruktur der Legierungen und ihren physikalischen und technischen Eigenschaften zu finden und dann Legierungen mit bestimmten Eigenschaften vorauszuberechnen, häufig nicht so arbeiten, wie der Chemiker sonst ähnliche Aufgaben löst. Er sucht aus einer umfassenden Sammlung experimenteller Unterlagen die Gesetzmäßigkeiten durch Vergleich heraus, hier aber muß man dem einzelnen, sich nicht wiederholenden Fall experimentell und auch theoretisch nachgehen, wobei gerade bei Metallen die moderne Quantentheorie auch in ihren Einzelheiten heranzuziehen ist.

Abb. 19. Schematischer Aufbau einer Faser aus Kriställchen (Mizellen)

Bei den Faserstoffen, zunächst besonders bei Baumwolle und Kunstseide, konnte aus den Röntgenuntersuchungen im Verein mit chemischen Methoden erschlossen werden, daß die Kohlenstoff-, Sauerstoff- und Wasserstoffatome, welche diese Stoffe aufbauen, lange, einige Tausend Atome umfassende Ketten bilden, die nur unter großem Kraftaufwand zerrissen werden können. Wie die Abbildung 19 zeigt, liegen nun in einer Faser sehr viele solcher Ketten nebeneinander und haften an sehr zahlreichen Punkten seitlich aneinander. Wird jetzt die Faser angespannt, so gleiten die Ketten aneinander vorbei, ohne daß ihre seitliche Verbindung ganz abreißt. So kommt das mit einer hohen Widerstandsfähigkeit gegen Zerreißen verbundene große Dehnungsvermögen der Faserstoffe zustande. Ausgehend von diesen Untersuchungen fand man dann in letzter Zeit, daß die oft überraschend hohe und vielfach technisch ausgenützte Festigkeit anderer organischen Werkstoffe, z. B. des Kautschuks und der Preßstoffe, wie Bakelit und ähnliches, ebenfalls von der Ausbildung solcher langer Atomketten herrührt. Auch in den zu den Eiweißen zu rechnenden natürlichen Haaren, vor allem der Wolle, dann auch in den Federn der Vögel und den Panzern der Eidechsen usw., bilden die Atome solche lange seitlich wieder lockerer verbundene Ketten. Andere Eiweiße bilden dagegen rundliche Moleküle.

Diese grundlegenden physikalisch-chemischen Ergebnisse haben dazu geführt, daß heute das Röntgeninterferenzverfahren in jedem wissenschaftlichen Laboratorium, in dem man es mit festen Stoffen zu tun hat, in großem Umfang angewendet wird, aber auch bei der Entwicklung neuer Werkstoffe in den Forschungslaboratorien der Industrie eine wichtige Aufgabe hat. Ebenso hat es sich in den Kontrollaboratorien der industriellen Betriebe schon verschiedentlich eingebürgert. Hierbei kommt eine neue Eigenschaft der Röntgeninterferenzen in Frage: in den

Debye-Scherrer-Diagrammen machen sich viele Einzelheiten des physikalischen Zustands bemerkbar, die dann wieder für die Festigkeit, die chemische Aktivität und andere bei der technischen Verwendung der Stoffe wesentliche Eigenschaften maßgebend sind. Man kann also häufig gerade die Feinheiten des Zustandes überwachen, die bei den sonstigen Untersuchungen verloren gehen. Im allgemeinen wird man damit nicht überhaupt Herstellungsfehler festzustellen suchen, denn diese sieht man meist mit anderen Prüfverfahren einfacher und deutlicher. Dagegen gestatten die Röntgeninterferenzen, die ja unmittelbar vom atomistischen Bau der Stoffe herrühren, häufig einen Schluß auf die Entstehungsursachen der Fehler und weisen damit auf die Möglichkeiten zur Abhilfe hin.

Von den vielen Beispielen solcher Anwendung können hier nur wenige genannt werden: Bei Metallen und Legierungen kann man genau die inneren Veränderungen verfolgen, die beim Walzen, Ziehen usw. und beim darauffolgenden Ausglühen eintreten. Das Kristallgitter selbst ändert sich bei diesen Behandlungen, abgesehen von kleineren Verzerrungen, nicht, dagegen werden die einzelnen Kriställchen durch die genannten mechanischen Eingriffe aufgespalten und gedreht, wobei äußerlich das Werkstück seine Form ändert, also zu fließen beginnt. Beim nachfolgenden Ausglühen vereinigen sich dann wieder die aufgespaltenen Kriställchen zu größeren Körnern. Es ist ohne weiteres verständlich, daß mit diesen tiefgreifenden Umbildungen starke, für die technische Verwendbarkeit ausschlaggebende Härteänderungen verknüpft sind. Ebenso zeigt das Röntgeninterferenzbild die dem Vergüten des Duralumins zugrunde liegenden inneren Veränderungen. Die dabei eintretende und technisch ausgenützte Härtesteigerung wird ähnlich wie beim Härten des Stahls durch gelöste Atome verursacht, die bei tiefen Temperaturen das Gitter verlassen wollen, aber noch nicht vollständig aus dem Gitter ausgetreten sind.

Bei der Herstellung der Kunstseide erhielt man zunächst Fäden, in denen die in Abbildung 19 dargestellten Kriställchen in allen Richtungen durcheinander lagen, während Vergleichsaufnahmen an natürlichen Fasern eine weitgehende parallele Lage ergaben, die auch — wie wir sahen — für die Festigkeit sehr wichtig ist. Durch Anwendung stärkeren Zugs beim Spinnverfahren gelang es daraufhin auch bei der Kunstseide, eine solche „Fasertextur“ herzustellen und damit ihre Festigkeit wesentlich zu verbessern.

Die chemische Industrie arbeitet heute in ganz großem Maßstab, z. B. bei der Herstellung von Ammoniak aus dem Luftstickstoff oder bei der Kohleverflüssigung, mit Kontakten (Katalysatoren), das sind pulverförmige Metalle oder Metalloxyde, welche die chemische Reaktion einleiten und beschleunigen, ohne sich selbst dabei zu verändern. Die wirksamen Stellen dieser Stoffe liegen nun an der Oberfläche der einzelnen Pulverteilchen, und je größer diese Oberfläche ist, desto aktiver ist der Katalysator im allgemeinen. Die dabei in Frage kommenden Teilchengrößen liegen weit unterhalb der mikroskopischen Sichtbarkeit; gerade diese

kleinen Teilchengrößen machen sich aber auf den Debye-Scherrer-Diagrammen durch eine mehr oder weniger starke Verbreiterung der Linien bemerkbar, so daß man mit ihrer Hilfe die Katalysatoren überwachen und verbessern kann.

Technisch besonders wichtig ist die Untersuchung der elastischen Spannungen in Konstruktionsteilen. Wird ein Werkstück von äußeren Kräften beansprucht, z. B. ein Brückenträger durch ein Gewicht belastet, so entstehen in seinem Innern elastische Dehnungen und Spannungen, d. h. die Atome des Werkstückes werden aus ihrer Ruhelage verschoben. Die Summe aller atomaren Kräfte, mit denen die Atome in ihre Ruhelage zurückzukehren suchen — die Summe der Spannungen — ist entgegengesetzt gleich der Summe der von außen angreifenden Kräfte. Werden die Verschiebungen aus der Ruhelage und damit die Spannungen zu groß, so tritt zunächst eine sogenannte plastische Verformung und schließlich der Bruch ein. Es ist daher sehr wichtig, die Spannungen zu kennen, die von einer gegebenen äußeren Belastung in den verschiedenartigen Konstruktionsteilen hervorgerufen werden. Wird ein überall gleichdicker Stab an beiden Enden gezogen, so kann man die Dehnung, die einer bestimmten Belastung entspricht, leicht messen. Da hier selbstverständlich die Spannung an allen Punkten des Stabes gleich ist, ist sie auch der äußeren Belastung — bezogen auf die Querschnittseinheit — gleich. Man kennt also aus diesem einfachen Zugversuch den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung; weiterhin kann man hierbei auch die Dehnung oder Spannung ermitteln, bei der das Material nachgibt. Hat nun das Werkstück eine kompliziertere äußere Form und greifen gleichzeitig mehrere äußere Kräfte an, so wird die Dehnung und damit die Spannung nicht mehr an allen Punkten des Werkstückes die gleiche sein, und jetzt erhebt sich die Frage, bei welcher äußeren Belastung und an welcher Stelle des Materials erstmalig die zum Bruch führende Spannung auftritt. Die mathematische Elastizitätstheorie beschäftigt sich mit der rechnungsmäßigen Beantwortung dieser Frage. Die Rechnungen sind aber schon für Teile, die im Maschinenbau häufig vorkommen, z. B. für die Drillung einer mit einem Schmierloch versehenen Welle, so verwickelt, daß sie nicht mit völliger Sicherheit durchgeführt werden können, so daß es wichtig ist, die Spannungen oder Dehnungen unmittelbar messen zu können. Nun kann man mit Hilfe mechanischer Meßwerkzeuge die Verlängerungen einzelner Teile der Oberfläche unmittelbar messen; wenn aber die Dehnungen im Bereich weniger Millimeter sehr stark wechseln, wie es z. B. bei dem erwähnten Schmierloch der Fall ist, wenn man also die Dehnung innerhalb eines Gebietes von der Größe eines Quadratmillimeters messen muß, dann versagen diese mechanischen Mittel.

Wenn der zu untersuchende Körper durchsichtig ist, so kann man häufig mit Hilfe von polarisiertem Licht die Spannungen bestimmen. Dies beruht darauf, daß ein unter einseitige Spannung gesetzter Körper doppelbrechend wird, also die Schwingungsebene eines durch ihn hindurchgehenden polarisierten Licht-

strahles dreht. Schickt man den durchgegangenen Lichtstrahl dann durch einen Analysator, d. h. durch einen ebenfalls doppelbrechenden und so eingestellten Kristall, daß er nur Licht mit einer senkrecht zur ursprünglichen Polarisationsrichtung liegenden Schwingungsrichtung durchläßt, dann erkennt man diese Drehung an einer Aufhellung des Gesichtsfeldes, während im spannungsfreien Zustand das polarisierte Licht vom Analysator vollständig ausgelöscht wird. Diese Erscheinung kann man zunächst qualitativ dazu benützen, um in Glaskörpern, z. B. in den Glaskolben der Glühlampen, die Anwesenheit von unerwünschten Abkühlungsspannungen festzustellen. Weiterhin kann man auf diese Weise aber auch die Lage und Größe der Spannungen zahlenmäßig bestimmen, allerdings nur dann, wenn alle Spannungen des ganzen Stückes in einer Ebene liegen, also nur zwei Hauptspannungen vorhanden sind und die im allgemeinen Fall noch hinzukommende dritte Hauptspannung überall Null ist. Diese aufeinander senkrecht stehenden Hauptspannungsrichtungen sind dadurch ausgezeichnet, daß eine mit ihnen zusammenfallende, mit Atomen besetzte Gerade unter dem Einfluß des Spannungsfeldes nur verkürzt oder gedehnt wird und keine Richtungsänderung wie die sonstigen Geraden erfährt. Fällt nun die Schwingungsebene des polarisierten Lichtes mit einer Hauptspannungsrichtung zusammen, so wird sie nicht gedreht, das Gesichtsfeld im Analysator erscheint also dunkel. Dreht man den zu untersuchenden durchsichtigen Körper gegenüber der feststehenden Polarisationsrichtung so lange, bis das Gesichtsfeld dunkel wird, so weiß man, daß nun die Schwingungsrichtung des polarisierten Lichtes an der durchstrahlten Stelle mit einer Hauptspannungsrichtung zusammenfällt. Dies kann man an jedem Punkte des Körpers ausführen und so die Hauptspannungslinien bis zur Oberfläche hin verfolgen, wo die einen von ihnen mit den Richtungen der äußeren Kräfte, die anderen mit der Oberfläche zusammenfallen müssen. Kennt man die äußeren Kräfte, so kann man jetzt, entlang der Hauptspannungslinien zurückrechnend, durch ein ziemlich kompliziertes Verfahren die Größe der Hauptspannungen an jedem Punkte des Körpers berechnen.

Dieses optische Verfahren hat schon manchen Aufschluß über die Spannungsverteilung in kompliziert gestalteten Konstruktionsteilen gegeben. Es muß dazu ein Modell des zu untersuchenden Körpers aus einem durchsichtigen, elastischen Material angefertigt werden. Seine offenbaren Nachteile, nämlich die Beschränkung auf Spannungszustände mit nur zwei Hauptspannungen, die Ausführbarkeit nur an Modellstoffen, die nicht unmittelbare Meßbarkeit der Spannungen, sind bei dem in den letzten Jahren entwickelten Röntgeninterferenzverfahren nicht vorhanden. Bei diesem Verfahren werden ganz unmittelbar die Abstände der Atome voneinander gemessen; zieht man von diesen die Abstände im unbelasteten Zustand ab (oder vergleicht man die Abstände in verschiedenen Richtungen miteinander), so erhält man die oben beschriebene Dehnung und damit auch die Spannung für den Punkt des Körpers, von dem die Interferenz-

aufnahme hergestellt war. Dabei werden Röntgenstrahlen benützt, die nur sehr wenig eindringen, und von den vielen nach Abbildung 19 auftretenden Interferenzstrahlen solche ausgewählt, die nahe in einer dem einfallenden Strahl entgegengesetzten Richtung den Aufnahmegegenstand verlassen. So erhält man die in Abbildung 20 gezeichnete Anordnung, mit der man die Spannung an jedem Punkt der Oberfläche auch eines ausgedehnten Körpers mit genügender Genauigkeit messen kann. Zur vollständigen Bestimmung des an einem Punkt der Oberfläche herrschenden Spannungszustandes braucht man drei bis vier Aufnahmen, von denen jede mindestens fünfzehn Minuten Belichtungszeit erfordert. Für eine Überwachung der Spannungen im Betrieb ist also das Verfahren heute nur in Ausnahmefällen geeignet, wohl aber zur Lösung grundsätzlicher Aufgaben. So konnte beispielsweise die Spannung in dem oben erwähnten verdrillten Stab mit Schmierloch ohne weiteres gemessen werden, und zwar ergab sich, daß sie in der Nähe des Schmierloches auf das Vierfache erhöht wird.

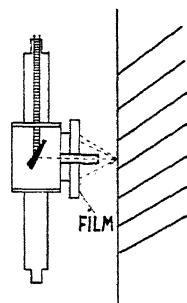



Abb. 20. Anordnung zur Spannungsmessung in dem rechts liegenden ausgedehnten Werkstück. Die Röntgenstrahlen sind punktiert gezeichnet

Wie im ersten Kapitel dieses Buches gezeigt wurde, verhalten sich Korpuskularstrahlen, insbesondere Elektronen hoher Geschwindigkeit, die durch einen Kristall gehen, ebenso wie Röntgenstrahlen, geben also dieselben wellenmäßigen Interferenzerscheinungen. Auch diese Entdeckung fand bald Eingang in einzelne Industrielaboratorien. Es macht keine wesentlichen Schwierigkeiten, Elektronenstrahlen aus Glühkathoden austreten zu lassen und durch elektrische Spannungen so zu beschleunigen, daß ihnen ähnliche Wellenlängen zukommen wie den sonst hierfür verwendeten Röntgenstrahlen, so daß sie geometrisch auch dieselben Interferenzen erzeugen. Ein großer Vorteil der Elektroneninterferenzen besteht darin, daß ihre Intensität im allgemeinen größer als die der Röntgenstrahleninterferenzen ist. Wenn man überhaupt Debyelinien bekommt, erhält man sie daher schon in Belichtungszeiten von Sekunden, während man bei Röntgenstrahlen dazu meist Stunden braucht. Diese große Intensität hängt mit der starken Absorption der Elektronenstrahlen in den Kristallen zusammen, die andererseits wieder ein großer Nachteil für die Anwendbarkeit ist. Diese Absorption ist so groß, daß man die Elektronenstrahlen mit einer für Interferenzaufnahmen genügenden Stärke nur durch Schichten von höchstens $^1/_{1000}$ mm Dicke hindurchbringt, während Röntgenstrahlen der entsprechenden Wellenlänge $^1/_{10}$ mm Dicke noch durchdringen. Man muß also die zu untersuchenden Materialien in diese Schichtdicken bringen, was häufig auf Schwierigkeiten stößt, oder man muß die Elektronenstrahlen an ihrer Oberfläche reflektieren lassen; dann aber sind die entstehenden Interferenzstrahlen sehr stark von geringen Rauhigkeiten und Höckern der Oberfläche bedingt, und man kennt heute noch nicht alle dabei mitspielenden

Einflüsse. Daher ist das Elektroneninterferenzverfahren zur Erforschung des Kristallbaues der Stoffe noch nicht vollkommen durchgebildet. Immerhin konnte man jetzt schon mit ihm den Aufbau dünner Schichten, z. B. der sich auf Aluminium bildenden Oxydschichten, untersuchen, die ja für den Widerstand des Aluminiums gegen chemische Angriffe sehr wichtig sind. Vermutlich wird jedoch auch in Zukunft das Röntgeninterferenzverfahren das am allgemeinsten anwendbare Hilfsmittel zur wissenschaftlichen und technischen Untersuchung des inneren Aufbaues der festen Körper bleiben.

6. Das Elektronenmikroskop

Wie am Schluß des vorhergehenden Abschnittes gezeigt wurde, kann man mit Elektronenstrahlen ebenso wie mit Röntgenstrahlen Interferenzaufnahmen machen. Daneben kann man sie aber noch in ganz anderer Weise verwenden, man kann sie nämlich, ebenso wie sichtbares Licht, zur Herstellung einer vergrößernden Abbildung eines Gegenstandes benützen, also ein Elektronenmikroskop bauen. Es beruht auf folgenden Tatsachen: Während man die Röntgenstrahlen nur mit Hilfe von Kristallen und auch damit in nicht bequem veränderlicher Weise um größere Winkel aus ihrer Bahn ablenken kann, ist dies bei Elektronenstrahlen mit Hilfe elektrischer oder magnetischer Felder sehr leicht möglich. Ein Beispiel hierfür bieten die schon in Kapitel 1 beschriebenen und beim Fernsehempfang verwendeten Braunschen Röhren. Man kann nun diese Ablenkung in der Ausdrucksweise der gewöhnlichen Optik beschreiben und auch berechnen. Tritt ein Elektronenstrahl in ein elektrisches oder magnetisches Feld, so erleidet er eine Brechung ganz ähnlich wie ein in Glas eintretender Strahl des sichtbaren Lichtes. Es hat sich gezeigt, daß eine Magnetspule oder ein elektrischer Plattenkondensator, durch die Elektronenstrahlen durchtreten, bei geeigneter Ausführung wie Linsen für diese wirken, also in genau berechenbarer Weise sie in Brennpunkten sammeln oder zerstreuen. Die Elektronen fallen dann auf einen im Innern des luftleer ausgepumpten Gefäßes angebrachten Leuchtschirm, wo sie ein sichtbares Bild hervorrufen.

Das mit solchen Linsen arbeitende Elektronenmikroskop kann bis jetzt nur dazu verwendet werden, Gegenstände aufzunehmen, die selbst Elektronen emittieren. Insbesondere wurde es dazu benützt, die Glühkathoden der Elektronenröhren, die ja solche Elektronen im Betrieb aussenden sollen, zu studieren. Man sieht auf diesen durch die Elektronen erzeugten Bildern die einzelnen Kristalle, die je nach ihrer Oberflächenbeschaffenheit mehr oder weniger „hell“ sind, d. h. mehr oder weniger Elektronen aussenden, man sieht auch die Veränderungen, welche diese Oberflächen während des Betriebes erleiden und kann so Rückschlüsse auf ihre günstigste Form ziehen.

Da die Elektronenlinsen natürlich ebenso wie die optischen Linsen, Linsenfeh-

ler, wie Astigmatismus usw. besitzen, kam man bisher mit den Elektronenmikroskopen nur zu scharfen Vergrößerungen von ungefähr 1000, was in Anbetracht der kurzen Entwicklungszeit, welche diese neue Optik durchlaufen hat, schon ein erstaunlicher Erfolg ist. Der Physiker knüpft aber an das Elektronenmikroskop noch ganz andere Erwartungen: Bekanntlich kann ein Mikroskop Gegenstände nicht deutlich darstellen, wenn sie nicht größer sind als die Wellenlänge des Lichtes, das zur Untersuchung dient. Daher hat das Auflösevermögen des mit sichtbarem Licht arbeitenden Mikroskops in der Gegend von $^1/_{1000}$ mm eine Grenze, die auch mit der besten Ausführung nicht unterschritten werden kann.

Die Wellenlänge, die man nach den in Kapitel 1 beschriebenen Beugungsversuchen den Elektronenstrahlen zuschreiben muß, ist nun ungefähr 1000mal kleiner als die des kurzwelligsten sichtbaren Lichtes. Daher könnte grundsätzlich das Elektronenmikroskop noch viel kleinere Einzelheiten scharf wiedergeben als das gewöhnliche Mikroskop. Allerdings müssen dazu auch wieder sehr große Vergrößerungen angewandt werden, bei denen die Fehler der bisherigen elektrischen und magnetischen Elektronenstrahlenlinsen so stark ins Gewicht fallen, daß kein gutes Bild zustande kommen würde. Aber es besteht keine grundsätzliche Grenze, die verhindern würde, daß man mit Elektronenstrahlen bei allmählicher Verbesserung der Konstruktion der magnetischen und elektrischen Linsen Einzelheiten in molekularen Dimensionen sichtbar machen könnte.

So dringt die Strahlenphysik im Dienst der Werkstoffuntersuchung immer tiefer in den Aufbau der Körper ein: Während das sichtbare und ultraviolette Licht meist nur die Oberfläche zu untersuchen gestattet, kann man mit der Röntgendurchstrahlung den groben Bau des Inneren, mit den Röntgeninterferenzen, allerdings auf dem Umweg über mathematische Rechnungen, den atomistischen Feinbau bestimmen. Mit dem Elektronenmikroskop wird es vielleicht möglich sein, diesen Feinbau unmittelbar anschaulich vorzuführen. Man wird aber auch manche Fragen, die mit den Interferenzverfahren nicht ohne weiteres zu lösen sind, klären können. Das gilt namentlich für Unregelmäßigkeiten im Feinbau, welche die technischen Eigenschaften der Werkstoffe oft entscheidend verbessern oder verschlechtern — mit Hilfe des Elektronenmikroskops wird man sie erstmalig messend verfolgen und damit der technischen Kontrolle unterwerfen können.

Verfasserverzeichnis

Sachverzeichnis